



CHALMERS



Robotgräsklippare med lutningshantering

Kandidatarbete inom signaler och system

Filip Petersson, Jacob Landelius, Joakim Gyllenskepp,
Simon Johansson, William Hübinette

Robotgräsklippare med lutningshantering

Filip Petersson, Jacob Landelius, Joakim Gyllenskepp,
Simon Johansson och William Hübinette

© FILIP PETERSSON, 2017.
© JACOB LANDELIUS, 2017.
© JOAKIM GYLLENKEPP, 2017.
© SIMON JOHANSSON, 2017.
© WILLIAM HÜBINETTE, 2017.

Handledare: Torsten Wik, Institutionen för signaler och system
Examinator: Balázs Adam Kulcsár, Institutionen för signaler och system

Kandidatarbete 2017:31
Institutionen för signaler och system
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Bild på prototypen som togs fram i projektet
Typsättning i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2017

Abstract

This report presents the development of a robotic lawn mower that can handle slopes with inclination up to 20 degrees. The main priorities have been to ensure that the robotic lawn mower keeps a straight course in steep slopes and cause a minimum amount of wear to the lawn.

The robotic lawn mower consists of a mechanical and an electrical system. The mechanical system includes a chassi and a bumper constructed in bended aluminum and wheels printed in PLA thermoplastic. The electrical system includes a drive and a signal system with power sources, electric speed controllers, motors, sensors and a microcontroller.

One of the most critical problems with steep slopes is that the robotic lawn mower tends to deviate from its course and results in an uneven cutting distribution. To solve this problem, a control system is implemented to adjust the direction and velocity of the robotic lawn mower.

The result of the project is a prototype of a robotic lawn mower that can navigate within a bounded area and avoid obstacles on the lawn. Using the control system considerably improves the directional precision of the robotic lawn mower. The average deviation of a 10 meters drive on flat ground was 6 centimeters. Driving perpendicular to a slope with an inclination of 24 degrees for 5 meters resulted in an average deviation of 22 centimeters.

Keywords: Robotic lawn mower, Inclination, VESC, CAD, Control system, Sensors

Sammanfattning

Denna rapport beskriver framtagningen av en robotgräsklippare, som klarar av körning i lutning upp till 20 grader. Projektets fokus har legat på att robotgräsklipparen ska bibehålla sin kurs i branta lutningar utan att orsaka något större slitage på gräsmattan.

Robotgräsklipparen består av ett mekaniskt och ett elektriskt system. Det mekaniska systemet innefattar chassi, stötfångare och hjul, där chassit och stötfångaren tillverkades i bockad aluminiumplåt och hjulen skrevs ut i termoplasten PLA med en 3D-skrivare. Det elektriska systemet består av ett drivsystem och ett signalsystem vilka bland annat innefattar energikälla, styrkort, motorer, sensorer och en mikrokontroller.

Ett av de mest kritiska problemen vid branta lutningar är att robotgräsklipparen tenderar att vika av från sin kurs vilket resulterar i en ojämn fördelning av klippningen. För att lösa detta problem implementerades ett regelsystem för att reglera riktning och hastighet.

Projektets resultat är en prototyp av en robotgräsklippare som kan navigera i ett avgränsat område och undvika eventuella hinder. Med hjälp av enkla reglertekniska metoder kunde robotgräsklippares riktningsprecision förbättras. Vid 10 meter körning på plan mark blev den genomsnittliga avvikelsen 6 centimeter och vid 5 meter körning tvärs över en lutning på 24 grader avvek robotgräsklipparen i genomsnitt 22 centimeter.

Nyckelord: robotgräsklippare, lutningshantering, VESC, CAD, regelsystem, sensorer

Förord

Varje vår utförs kandidatarbeten på Chalmers tekniska högskola. Detta är ett projekt under Institutionen för signaler och system och har utförts av studenter från maskinteknik, datateknik och elektroteknik och är det avslutande projektet för kandidatexamen. Med tidigare kunskaper som grund, tillsammans med praktiska samt teoretiska kunskaper som erhållits under projektet gång, har en prototyp av en robotgräsklippare konstruerats.

Ett stort tack ska riktas till vår handledare Torsten Wik för kvalitativ konsultation och diskussioner. Även ett stort tack till Endre Berta på Husqvarna för bidragande av komponenter och konsultation. Övrigt tack till forskningsingenjörerna i Prototyplabbet, Institutionen för signaler och system och Gunnar Elgered.

SSYX02-17-31, Göteborg, Maj 2017

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Problem och uppgift	2
1.4	Avgränsningar	3
2	Konceptval	5
2.1	Kravspecifikation	6
2.2	Val av styrmetod	7
2.3	Val av navigationsalgoritm	7
2.4	Val av drivning, hjul och hjulplacering	7
2.5	Val av reglersystem	9
2.6	Val av komponenter	10
2.6.1	Motorer till robotgräsklipparens drift	10
2.6.2	Styrning av drivmotorer	11
2.6.3	Energikälla till drivsystemet	13
2.6.4	Sensorer för fastställande av tillstånd	13
2.6.5	Mikrokontroller för datahantering	15
2.6.6	Klippaggregat	15
2.6.7	Chassi för montering av komponenter	17
3	Metod och genomförande	19
3.1	Mekanisk konstruktion	19
3.1.1	Framtagning och montering av konstruktionsplåtar	20
3.1.2	Beräkningar och konstruktion av stötfångare	22
3.1.3	Hjul och motorfästen	25
3.2	Elektrisk konstruktion	25
3.2.1	Signalsystem	25
3.2.2	Drivsystem	27
3.3	Framtagning av reglersystem	29
3.3.1	Reglering av vinkel för att hålla rak kurs	29
3.3.2	Simulering av vinkelreglering	31
3.3.3	Reglering av motorernas hastighet	32
3.4	Programmering av robotgräsklipparen	34
3.4.1	Kodens uppbyggnad	34
3.4.2	Implementation av reglersystemet	34

3.4.3	Implementation av gyroskop	35
3.4.4	Implementation av ultraljudsensor	36
3.4.5	Implementation av stötsensor	36
3.4.6	Implementation av infraröd sensor	36
3.5	Testplan	37
3.5.1	Val av testmetod	37
3.5.2	Mätinstrument och testområde	38
4	Resultat	41
4.1	Slutgiltig prototyp av mekanisk och elektrisk konstruktion	42
4.2	Enklare tester för att utvärdera prototypens funktion	43
4.3	Tester för att utvärdera prototypens förmåga att hålla rak kurs	44
4.3.1	Tester vid plan mark	45
4.3.2	Tester ortogonalt mot lutning	47
4.3.3	Tester diagonalt uppför lutning	49
4.3.4	Tester rakt upp för lutning	50
4.4	Validering av kravspecifikation	51
5	Diskussion	53
5.1	Tolkning och analys av huvudresultatet	53
5.2	Metodens inverkan på resultatet	55
5.2.1	Iakttagelser vid mekanisk och elektrisk konstruktion	55
5.2.2	Reglersystemets approximationer och dess följder	56
5.2.3	Påverkan av vald testmetod	56
5.3	Jämförelse med existerande robotgräsklippare	56
5.4	Vidareutveckling och resultatets användningsområden	57
6	Slutsatser	59
	Appendix	61
A	Intervju med Endre Berta	63
B	Pughmatris	67
C	Drivmotorernas karakteristik	69
D	Inställningar i BLDC Tool	71
E	Härledning av robotgräsklipparens överföringsfunktion	73
F	Simulink över vinkelreglering	75
G	Beräkning av hastighetsregulator	77
H	Programmeringskod och flödeschema	79
I	Sprängskiss över mekaniska komponenter	83

J	Specifikationer av dagens robotgräsklippare	85
----------	--	-----------

Förkortningar

BLDC motor	Brushless direct current motor
CTH	Chalmers tekniska högskola
DC motor	Direct current motor
ESC	Electronic speed controller
FIR	Finite impulse response
FOC	Field oriented control
IIR	Infinite impulse response
IMU	Inertial measurement unit
PPM	Pulse position modulation
UART	Universal asynchronous reciever tranciever
VESC	Vedder electronic speed controller

1

Introduktion

1.1 Bakgrund

Redan på 300-talet fanns det trädgårdar med välvårdade gräsmattor, men tillväggångssättet att klippa gräs har sedan dess utvecklats avsevärt [1]. Lien är det redskap som främst användes förr i tiden och kom att ersättas med smidigare metoder. Den första handgräsklipparen uppfanns redan år 1830 och i början av 1900-talet fanns både maskin- och hästdrivna gräsklippare på marknaden. Åkgräsklipparen kom att bli populär på 1900 talet [1].

Ovanstående teknik kräver mänsklig medverkan och är tidskrävande. För att minimera mänsklig interaktion kan tidigare metoder ersättas med en robot som klipper gräset [2]. Robotgräsklipparen har funnits sedan 1990-talet. År 1994 gav t.ex. företaget Husqvarna Group AB ut sin första robotgräsklippare och har sedan dess varit bland de ledande företagen inom branschen [1, 3].

Robotgräsklipparen är en mobil plattform som består av bl.a. batteri, motorer, knivar, mikroelektronik och sensorer. Fördelarna med robotgräsklipparen är många då de är användarvänliga, vårdar normalt gräset bättre än traditionella gräsklippare och arbetar utan bevakning [1, 4]. Därför har robotgräsklipparbranschen växt avsevärt de senaste åren. Under 2013 ökade marknaden med 30-40 %, där Sverige stod för 12 % av den globala marknaden [5]. Trots denna tillväxt är robotgräsklippare fortfarande relativt dyra och detta är en bidragande faktor till att många potentiella kunder håller fast vid sin traditionella gräsklippare [2]. Vidare finns ett tydligt samband mellan pris och hantering av lutning som är kopplat till att robotgräsklippare ofta har problem att klippa i branta lutningar [1, 6]. De flesta av dagens robotgräsklippare klarar av lutningar upp till 16 grader och de mest exklusiva modellerna upp till 24 grader [6]. För konsumenter med komplicerade trädgårdar kan detta avskräcka från att köpa robotgräsklippare och det har bl.a. därför växt fram ett hobbyintresse att bygga egna robotgräsklippare [1].

Vid en intervju med Endre Berta, testingenjör på Husqvarna, konstaterar han att problemet med lutningshantering för robotgräsklippare är svårt. Han fortsätter att förklara att det är en konsumentbranch där problemet behöver lösas samtidigt som slitaget på gräset blir så litet som möjligt, se appendix A.

1.2 Syfte

Syftet med det här projektet har varit att konstruera en prototyp av en robotgräsklippare som kan navigera i ett avgränsat område med hinder, samt hantera de problem som uppstår vid drift i lutning.

1.3 Problem och uppgift

Projektets ändamål är att konstruera en prototyp av en robotgräsklippare från grunden vars prestanda kan utvärderas och förbättras allteftersom. Nedan följer de krav som kan ställas på en sådan produkt och vilka problem som behöver lösas.

En robotgräsklippare måste kunna hålla sig inom ett begränsat område. Detta är problematiskt då den på något sätt behöver bekräfta att den inte befinner sig utanför området. Den vanligaste lösningen till detta problem är att använda en begränsningskabel som placeras längst trädgårdens kanter. När robotgräsklipparen känner av begränsningskabeln byter den riktning och följer antingen ett slumpmässigt eller bestämt mönster [7]. En annan lösning är att placera fysiska avgränsningar kring trädgårdens periferi. Robotgräsklipparen kolliderar då med avgränsningen och byter därefter riktning.

En robotgräsklippare måste dessutom kunna hantera eventuella hinder som befinner sig inom området. Rimligen ska robotgräsklipparen undvika dessa eller navigera sig bort vid kollision. En väletablerad lösning är att placera stötsensorer som känner av när robotgräsklipparen kolliderar med ett objekt [8].

Vidare ska en robotgräsklippare även klara av att drivas utan mänsklig medverkan efter driftsättning. Den bör dessutom vara lätt att hantera i form av vikt och utformning.

Utefter de ovan nämnda problemen utformas de grundläggande kraven som prototypen ska klara av till:

- Navigering inom ett begränsat område
- Hantering av eventuella hinder som kan uppstå i en trädgård
- Drivas med minimal mänsklig medverkan samt lätthanterlig

Vidare kommer robotgräsklipparens förmåga att hantera lutning utvecklas. Majoriteten av dagens robotgräsklippare fungerar väl på enkla gräsytor när förhållandena är goda. När det kommer till mer utmanande terränger börjar brister uppenbara sig.

Nedan följer några problem som kan uppstå vid drift i brant backe, vilka Berta identifierade under intervjun, se appendix A.

- Vid kraftiga uppförsbackar riskerar robotgräsklipparens hjul att slira. Detta kan skada gräsmattan och göra det svårt för robotgräsklipparen att ta sig upp för backen.
- När robotgräsklipparen stöter på hinder i nedförsbacke kan den börja spinna och slita gräset på grund av att den inte klarar av att backa i uppförsbacke. Här är det av stor betydelse att robotgräsklipparen har bra fäste på gräsmattan. Fästet beror främst på hjulens utformning och en väl placerad tyngdpunkt.
- Robotgräsklipparen kan avvika från sin kurs när den kör i ett lutande plan. Detta resulterar i en ineffektiv fördelning av klippningen då sannolikheten att robotgräsklipparen befinner sig på den nedre delen av trädgården blir störst och i vissa fall klipps inte hela gräsmattan. Här behövs en lösning för att robotgräsklipparen ska behålla rak kurs.

Detta projekt fokuserar på att förbättra robotgräsklipparens förmåga att lösa ovanstående problem vid lutning upp till 20 grader.

1.4 Avgränsningar

Då projektet sker under begränsad tid tas en enkel prototyp fram. Prototypen ämnar främst att testa de grundläggande kriteriernas grad av uppfyllnad samt utvärdera lutningshanteringen. Ingen optimering av de mekaniska komponenterna görs. Ytterligare lösningar som förbättrar robotgräsklipparens prestanda implementeras i mån av tid.

Prototypen tas inte fram för massproduktion och därför utförs inga kostnads- och tillverkningsberäkningar. Däremot sätts en budget för projektet på 5000 SEK för inköp och 2000 SEK för material från prototypplabbet på CTH.

Prototypen behöver enbart fungera en kortare tid innan laddning behövs. Laddning av batteriet görs manuellt och aspekter kring automatisk laddning via laddningsstation tas inte hänsyn till i det här projekt.

Implementation av begränsningskabel eller liknande lösning anses vara relativt kostsam, tidskrävande och irrelevant då projektet fokuserar på lutningshantering. Kravet på att navigera inom ett visst begränsat område testas istället genom att området avgränsas av fysiska objekt som robotgräsklipparen kan detektera och förhålla sig inom.

Kvaliteten på hur väl gräset klipps undersöks inte under detta projekt då det endast är en enkel prototyp som tas fram. Detta lämnas till vidare undersökning och utveckling.

2

Konceptval

Idag finns det otaliga modeller av robotgräsklippare från flera olika tillverkare, som t.ex. *Husqvarna*, *Honda*, *Bosh*, *Gardena*, *Stiga* och *Ambrogio*. Modellerna skiljer sig både i pris och specifikationer vad gäller klippyta, klipptid, lutningshantering med mera. En robotgräsklippare är relativt enkelt uppbyggd med få grundläggande komponenter. De centrala delarna är mekanik och elektronik med de ingående komponenterna: motorer, batteri, processor, sensorer, klippaggregat och hjul [7].

Inledningsvis presenteras en kravspecifikation. Utifrån kravspecifikationen motiveras val av robotgräsklipparens ingående system och komponenter. Även nödvändig teori kring komponenterna behandlas i detta kapitel.

2.1 Kravspecifikation

En kravspecifikation fastställs för att på ett översiktligt sätt avgöra om syftet med projektet är uppfyllt och behöver därför kunna verifieras med hjälp av tester, simuleringar eller beräkningar. För att kriterierna ska vara verifierbara sätts ett kvantifierbart målvärde. Kriterierna i kravspecifikationen är uppdelad i fem kategorier: *funktion*, *prestanda*, *säkerhet*, *dimensioner* och *kostnader*.

Exempel på kriterier är krav på maximal avvikelse från riktning vid lutning och framkomlighet vid 20 graders lutning. Utifrån SEK Svensk Elstandard togs även de mest väsentliga kraven på säkerhet och funktion med. I tabell 2.1 presenteras den fullständiga kravspecifikationen där *K* står för *krav* och *Ö* står för *önskemål*.

Tabell 2.1: Kravspecifikation

	Chalmers Tekniska Högskola	Kravspecifikation				
	SSYX02-17-31					
	Kriterier	K/Ö	Målvärde	Enhet	Verifiering	Referens
Funktion	Lägsta klipphöjd	K	<60	mm	Test av prototyp	Internt
	Lägsta klipphöjd	Ö	<50	mm	Test av prototyp	Internt
	Hålla sig inom ett begränsat område	K		-	Test/simulering	Internt
	Stanna drivmotorerna vid kollision	K	1	s	Test/simulering	SS-EN-50636-2-107
	Stanna drivmotorerna vid kollision	Ö	<1	s	Test/simulering	SS-EN-50636-2-107
	Detektera föremål framför dess körriktning	K	>300	mm	Test/simulering	SS-EN-50636-2-107
	Höj och sänkbart klippaggregat	Ö	30 - 50	mm	Test av prototyp	Internt
Prestanda	Max avvikelse från rikturs efter 10 m körsträcka på torrt gräs vid 0° lutning	K	<200	mm	Test	Internt
	Max avvikelse från rikturs efter 10 m körsträcka på torrt gräs vid 0° lutning	Ö	<100	mm	Test	Internt
	Max avvikelse från rikturs efter 5 m körsträcka på torrt gräs vid lutning <20°	K	<1000	mm	Test	Internt
	Max avvikelse från rikturs efter 5 m körsträcka på torrt gräs vid lutning <20°	Ö	<200	mm	Test	Internt
	Framkomlighet på torrt gräs vid lutningar <20° utan slirning	K		Ja	Test	Internt
	Hastighet	K	>0	m/s	Test/simulering	Internt
	Drifttid innan laddning	K	30	min	Beräkning	Internt
	Drifttid innan laddning	Ö	>30	min	Beräkning	Internt
	Svängradie	K	1000	mm	Beräkning/mätning	Internt
	Svängradie	Ö	0	mm	Beräkning/mätning	Internt
Säkerhet	Lyftsensor aktiveras då alla hjul saknar kontakt med marken	Ö			Test	SS-EN-50636-2-107
	Lyftsensor aktiveras då ett hjul saknar kontakt med marken	K	<100	mm	Test	Internt
	Stanna klippaggregat då lyftsensorn aktiveras	K	<5	s	Test/simulering	Internt
	Stanna klippaggregat då lyftsensorn aktiveras	Ö	<2	s	Test/simulering	SS-EN-50636-2-107
	Klippaggregatet är oåtkomligt då alla hjul har kontakt med marken	K			Konstruktion	Internt
	Kablage ska vara fastspänt och skyddat från omgivningen	K			Konstruktion	Internt
Dimensioner	Längd	K	<600	mm	Prototyp/CAD-modell	Internt
	Längd	Ö	<450	mm	Prototyp/CAD-modell	Internt
	Höjd	K	<250	mm	Prototyp/CAD-modell	Internt
	Höjd	Ö	<200	mm	Prototyp/CAD-modell	Internt
	Bredd	K	<500	mm	Prototyp/CAD-modell	Internt
	Bredd	Ö	<400	mm	Prototyp/CAD-modell	Internt
	Max vikt	K	15	kg	Mätning	Internt
	Max vikt	Ö	<10	kg	Mätning	Internt
Kostnader	Totalkostnad	Ö	<7000	SEK	Beräkning	Uppdragsgivare

2.2 Val av styrmetod

För att robotgräsklipparen ska kunna ändra riktning på ett effektivt och smidigt sätt är det nödvändigt att välja en lämplig styrmetod. De två vanligaste metoderna för att styra ett fordon är differentialstyrning och ackermanstyrning. Vid differentialstyrning roterar hjulen oberoende av varandra vilket medför att fordonet kan svänga genom att rotera hjulen med olika hastighet. Detta resulterar i en mycket kort svängradie men fungerar sämre vid höga hastigheter. Ackermanstyrning sker istället genom att vinkla styrhjulen, som är monterade på samma axel, vilket ger en mjuk och följsam manövrering vid höga hastigheter [9].

För detta projekt är differentialstyrning lämpligast, dels för att robotgräsklipparen körs med låg hastighet, och dels för att detta möjliggör hög framkomlighet, vilket är önskvärt vid mer komplexa gräsmattor.

2.3 Val av navigationsalgoritm

Eftersom robotgräsklipparen ska kunna klippa hela gräsmattan krävs det en navigationsalgoritm. Vanligtvis används en algoritm kallad *random-pattern* som innebär att robotgräsklipparen kör runt slumpmässigt på gräsmattan. När robotgräsklipparen stöter på hinder byter den körriktning genom att den roterar en slumpmässig vinkel. Detta är en navigeringsalgoritm som förlitar sig på att robotgräsklipparen kör tillräckligt frekvent så att den trots en relativt låg effektivitet klipper hela gräsmattan.

För detta projekt används *random-pattern* istället för en mer avancerad lösning då fokus ligger på lutningens negativa inverkan på körriktningen.

2.4 Val av drivning, hjul och hjulplacering

Det finns fyra typer av drivning som är relevanta för detta projekt, dessa är bakhjulsdrift, framhjulsdrift, fyrhjulsdrift och banddrift. Utifrån dessa fyra typer tas fem olika koncept på kombinationer av drivning och hjulplacering fram.

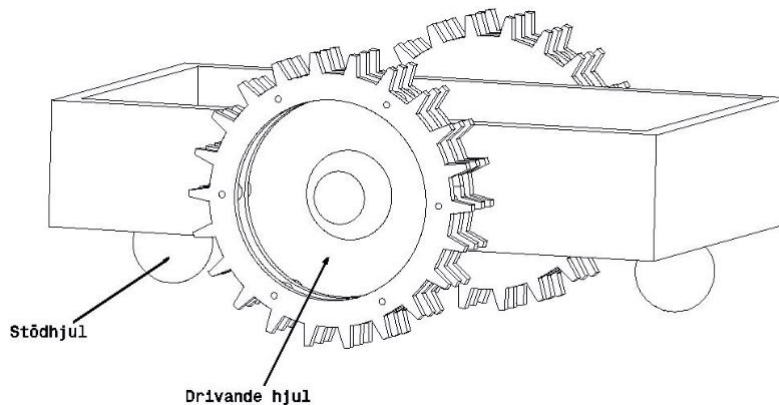
- Koncept 1 – Trehjuling: två drivande hjul baktill och ett främre styrhjul placerat i mitten.
- Koncept 2 – Fyrhjuling med fyrhjulsdrift.
- Koncept 3 – Mitt-hjuling med två drivande hjul placerade mitt på robotgräsklipparen samt ett stödhjul i front och bakända.
- Koncept 4 – Fyrhjuling med tvåhjulsdrift.
- Koncept 5 – Banddrift.

För att välja det mest lämpade konceptet för detta projekt gjordes en Pugh-matris där koncepten jämförs med varandra utifrån kostnad, framkomlighet, grässlitage och komplexitet, se appendix ?? . För lutningshanteringen är fyra hjul mer fördelaktigt än tre eftersom detta ger en mer stabil design. Koncept 3 kan däremot rotera

fritt kring sin egen axel olikt koncepten med fyra hjul. En robotgräsklippare med fyrehjulsdrift, likt koncept 2, antas även vara mindre benägen att börja slira än en tvåhjulsdreven. Däremot är en sådan konstruktion mer komplex eftersom differentielstyrningen måste tillämpas på fyra hjul.

En banddriven robotgräsklippare förmodas ha goda egenskaper vid terränghantering men dess svårigheter vid manövrering och implementation gör att detta koncept inte är önskvärt för detta projekt.

Med ovanstående resonemang och resultat från Pugh-matrisen väljs koncept 3 på grund av simpliciteten hos en tvåhjuling. Liknande stabilitetsegenskaper som en robotgräsklippare med fyra hjul fås med hjälp av de två stödhjulen. I figur 2.1 visas en skiss över det valda konceptet.



Figur 2.1: Skiss över koncept 3, det valda konceptet för hjulsammansättning

Dimensionering av drivhjulen har betydelse eftersom det påverkar erforderligt moment från motorerna. Eftersom motorerna är mer kostsamma än hjulen dimensioneras drivhjulen efter vald motor. Fördelen med större hjul är att förutsättningarna att hantera ojämnt underlag förbättras. För att uppfylla kravet om framkomlighet, se tabell 2.1, ska robotgräsklipparen inte slira. Därför är val av material och hjulmönster viktigt.

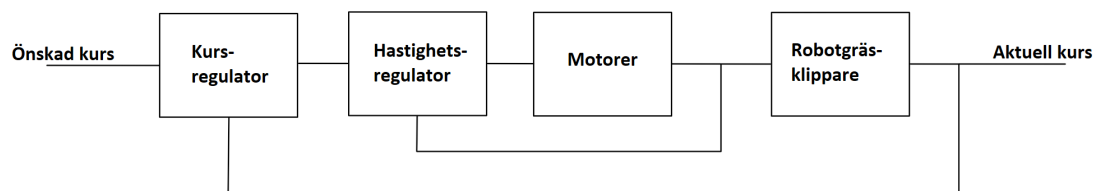
Den italienska robotgräsklipparen Ambrogio har tagit fram en hjuldesign på sin modell *Ambrogio L85* som hanterar upp till 28 graders lutning [10]. På grund av dess goda lutningshantering används liknande design för detta projekt.

Stödhjul används i båda ändar av robotgräsklipparen för att chassit inte ska släpa i marken vid körning. Dessa är fria att rotera i alla riktningar för att inte hindra robotgräsklipparens rotation.

2.5 Val av reglersystem

Ett reglersystem behöver implementeras för att angripa problemen med kursavvikelse samt framkomligheten i lutningar upp till 20 grader som specificeras i kravspecifikationen, se tabell 2.1. Målen med reglersystemet är att robotgräsklipparen inte ska vika av från sin kurs för att få så effektiv klippning som möjligt i lutande arbetsområden och att robotgräsklipparen ska röra sig med mjuka rörelser. Det senare innebär att robotgräsklipparen ska accelerera mjukt från en stillastående position för att undvika att hjulen slirar.

Då differentialstyrning används måste reglersystemet styra vinkelhastigheten på robotgräsklipparens hjul. För att erhålla ett börvärde på vinkelhastigheten måste data omvandlas från avvikelse av kurs till vinkelhastighet. Därför delas reglersystemet in i två delar. En yttre del som tar ett börvärde på robotgräsklipparens kurs och omvandlar till en vinkelhastighet. En inre del som tar ett börvärde på vinkelhastighet och ser till att hastigheten hålls. I figur 2.2 visas en enkel skiss över det valda reglersystemet.



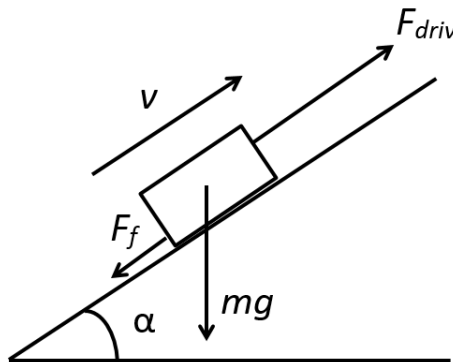
Figur 2.2: Skiss över det valda reglersystemet som består av en inre och en yttre del

2.6 Val av komponenter

För att konstruera en fungerande prototyp som uppfyller projektets syfte krävs teoretisk bakgrund av de ingående komponenterna. Av detta skäl presenteras teori samt val av komponenter till prototypen nedan. Majoriteten av besluten tas utifrån kravuppfyllnad och kostnad där kraven ska vara uppfyllda till ett lågt pris.

2.6.1 Motorer till robotgräsklipparens drift

Drivmotorernas roll i systemet är att manövrera robotgräsklipparen i olika riktningar. Det är önskvärt att detta sker felfritt genom högt gräs, i backar och vid körning över mindre hinder. Eftersom likströmsmotorer (DC motorer) är effektiva att varvtalsreglera är dessa lämpliga för ändamålet [11]. För att ta fram vilka krav som ställs på drivmotorerna för att uppnå projektets mål ställs en enkel modell upp över systemet. För att säkerställa att drivmotorerna uppfyller kraven i verkligheten betraktas robotgräsklipparen något förenklat som en homogen massa m , accelererande i ett plan med lutningen α enligt figur 2.3.



Figur 2.3: Enkel modell över systemet i en lutning, där klossen representerar robotgräsklipparen

Kraften F_{driv} i modellen är den sammanlagda drivande kraften från respektive hjul och kraften F_f är den motsatta friktionskraften från gräset som robotgräsklipparen upplever. Friktionskraften ges av

$$F_f = \mu mg \cos \alpha \quad (2.1)$$

där $\mu = 0.1$ är ett uppskattat värde på friktionskoefficienten för gräs [12]. Då modellen är överdimensionerande med friktionskraften bortses tröghetsmoment och andra icke idealiteter. Genom att anta att robotgräsklipparen accelererar i lutningen samt att ingen av hjulen slirar erhålls en kraftbalans

$$mg \sin \alpha + F_f + ma - F_{driv} = 0 \quad (2.2)$$

där $g = 9.82$ är tyngdaccelerationskonstanten, m är systemets massa, a är accelerationen och α är lutningen. Från varje hjul krävs då ett vridmoment T enligt

$$T = \frac{r F_{driv}}{n} \quad (2.3)$$

där r är hjulens radie samt n är antalet hjul. Effekten som krävs från varje motor ges av

$$P = \omega T \quad (2.4)$$

där ω är hjulets vinkelhastighet som ges av $\omega = \frac{v}{r}$, där v är klipparens hastighet. Genom att ansätta $v = 0.5 \text{ [m/s]}$, $m = 15 \text{ [kg]}$, $r = 12.5 \text{ [cm]}$, $a = 0.1 \text{ [m/s}^2\text{]}$ och $\alpha = 20^\circ$ erhålls kraven listade i tabell 2.2.

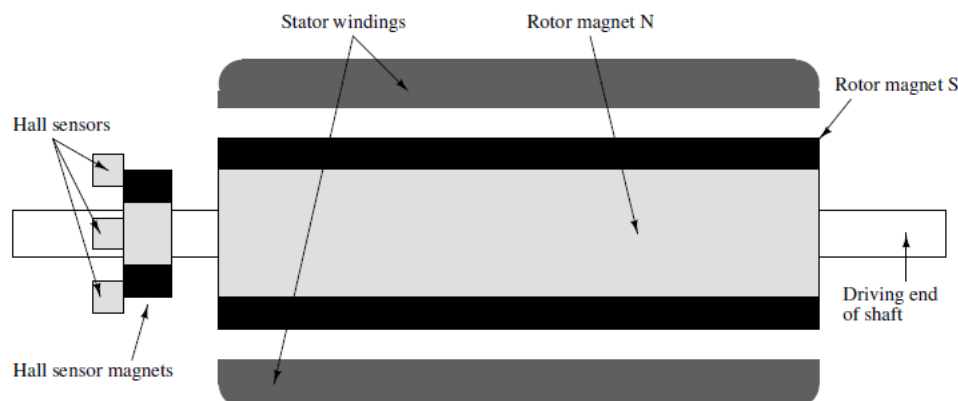
Tabell 2.2: Krav på drivmotorer

Parameter	2-hjulsdrift
Moment, T	4.1 Nm
Varvtal, ω	38.2 rpm
Effekt, P	16.4 W

Den konventionella borstade DC motorn har nackdelar som hög ljudnivå och kräver periodiskt underhåll, vilket gör den mindre lämplig för konsumentbranschen. Den borstlösa DC motorn (BLDC) är däremot tyst, har lång livslängd och har ytterligare fördelar som t.ex. högre vridmoment per viktenhet och högre effektivitet [13, 14]. Därför valdes en BLDC motor som drivmotor, vilken Husqvarna bidrog med. Den valda motorns karakteristik demonstreras i appendix C.

2.6.2 Styrning av drivmotorer

De många fördelarna med BLDC motorn kommer också med nackdelen att den är betydligt svårare att styra på grund av att motorn har tre faser som ska kommuteras elektriskt. En enkel BLDC motor kan ses som en inverterad borstad DC motor då rotorn består av en permanentmagnet och statorn består av 3 statiska lindningar [14]. En tvärsnittsskiss av en BLDC motor visas i figur 2.4.

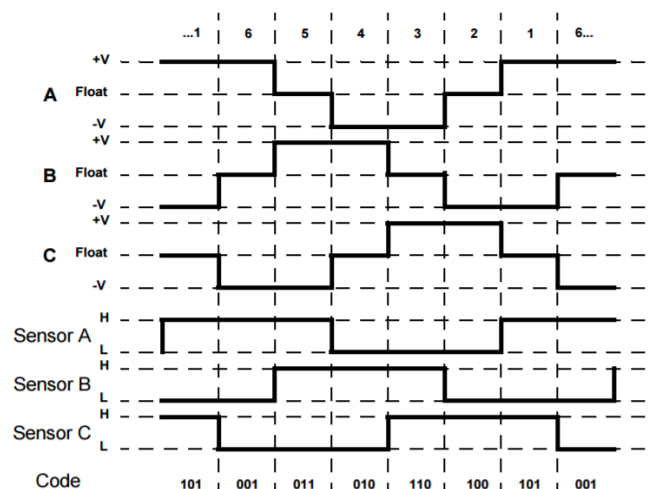


Figur 2.4: Principskiss av en BLDC motor [14]

Ett typisk tillvägagångssätt att styra en trefas BLDC motor är att strömmen endast går i de två faserna som ger högst vridmoment medan den tredje fasen är avstängd. Den fas som ger högt vridmoment befinner sig 90 grader från rotorn medan den fas som är parallell med motorn inte producerar något vridmoment alls. För att kunna avgöra vilka faser som strömmen ska gå i krävs ytterligare komponenter, såsom sensorer och styrkort. En fas förses med elektrisk energi när rotorn är 120 grader från fasen och stängs av när rotorn är 60 grader från fasen, då nästa fas istället aktiveras [14, 15].

Ett annat tillvägagångssätt att styra BLDC motorn kallas för Field Oriented Control (FOC). Denna metod delar upp fälten som vardera statorlinding producerar i två komponenter, en komponent parallellt med rotorfältet och den andra ortogonalt. Genom att reglera strömmen i faserna med två PI-regulatorer, en för den parallella komponenten och en för den ortogonala komponenten, kan det önskade vridmomentet uppnås. Regulatorn för den parallella komponenten har som referensvärde 0 då den inte bidrar till något nyttigt vridmoment medan regulatorn för den ortogonala komponenten har referensvärde i enlighet med det önskade vridmomentet. För att dela upp fälten i dessa komponenter utförs transformationer som också efter regulatorerna behöver transformeras tillbaka, vilket kräver kraftfulla mikroprocessorer. Det här sättet att styra BLDC motorer ger större effektivitet och ett mindre rippel i vridmomentkurvan [14]. Då mikroprocessorer har blivit betydligt kraftfullare har denna metod blivit mer populär.

För att avgöra vilken position rotorn befinner sig i används ofta hallsensorer. Dessa sensorer skickar en signal till styrkortet som styr motorn med vald metod. Hallsensorerna ger en logisk etta (1) för 180 elektriska graders rotation och en logisk nolla (0) för resten av rotationen. Genom att sätta tre hallsensorer med en offset på 60 elektriska grader ifrån varandra ges den önskvärda informationen till styrkortet [13, 15]. Ett diagram som visar förhållandet mellan sensornivåerna och varje fasspänning skildras i figur 2.5.



Figur 2.5: Diagram över förhållandet mellan hallsensorernas utslag och spänningen i varje fas [15]

Ett annat sätt att detektera vilket läge motorn befinner sig i är genom den motriktade elektromagnetiska kraften (mot-EMK). En av de tre motoringångarna som för tillfället inte är aktiv används för att mäta mot-EMK-spänningen. På så sätt behövs inte hallsensorer men innebär istället att motorn måste gå med en minsta hastighet för att kunna få en tillräckligt stor mot-EMK [15].

Vid val av motorstyrning är det viktigt att styrkortet ska kunna hantera både strömmen och spänningen som drivmotorn till robotgräsklipparen behöver. Den valda motorn är specificerad till 18 [V] och den maximala strömmen enligt motorspecifikationerna i appendix C är 7 [A]. Då robotgräsklipparen ska kunna accelerera mjukt från stillastående position i branta backar ska den valda motorns hallsensorer användas. Detta innebär att det valda styrkortet för drivmotorerna ska ha sensoringång. Med dessa krav som grund väljs ett styrkort som kallas VESC och står för Vedder Electronic Speed Controller. VESC kan även styra motorerna genom FOC, vilket är ett stort plus. Styrkortet är skapat av Benjamin Vedder, och är ett projekt med öppen hård- och mjukvara. Genom att köpa in detta styrkort istället för att utveckla ett själva sparas mycket tid.

2.6.3 Energikälla till drivsystemet

För att driva en robotgräsklippare används oftast laddningsbara litiumjonbatterier. Batteriet ska driva motorerna, processorer och resterande elektronik och behöver därför vara relativt kraftfullt. Enligt kravspecifikationen i tabell 2.1 ska prototypen klara minst 30 minuter klippning. Eftersom motorerna förbrukar mest energi går det utifrån tidigare beräknade effekt räkna ut batteriets minsta kapacitet genom att beräkna strömmen som systemet drar enligt

$$I = \frac{P}{U} \quad (2.5)$$

där P är den totala effekten från motorerna och U är matningsspänningen. Kapaciteten ges sedan av

$$Q = It \quad (2.6)$$

där t är batteritiden. Med ovanstående beräknade effekt och en motorspänning på 18 [V] krävs ett batteri med kapaciteten 0.5 [Ah]. Husqvarna bidrog med ett Li-ion-batteri med kapaciteten 3.2 [Ah] och en nominell spänning på 18 [V].

2.6.4 Sensorer för fastställande av tillstånd

Robotgräsklipparen kan styras genom att använda sensorer som läser av omgivningen och tillgodoser robotgräsklipparen med värden för att avgöra dess aktuella tillstånd. Exempelvis behövs sensorer som känner av om robotgräsklipparen krockar med något, varnar inför kollision samt känner av om den lyfts upp. Med hjälp av dessa tillstånd kan robotgräsklipparen bromsa in och vända vid kollision samt stänga av klipp- och drivmotorer då den lyfts upp. I kommande stycken beskrivs sensorer som används för att prototypen ska uppfylla kravspecifikationen i tabell 2.1.

För att undvika att robotgräsklipparen sakta avviker från sin kurs vid branta lutningar går det att använda sig av sensorer som mäter rörelse, vridning eller position. Exempelvis kan accelerometer, gyroskop, GPS, Wi-fi eller positionsfyrar användas. Då positionsfyrar är kostsamma och GPS är beroende av bra förhållanden väljs dessa bort [16]. Även Wi-Fi väljs bort då det kräver flera åtkomstpunkter för att mäta position vilket är kostsamt. Accelerometer medför mätfel som kan ge dålig precision [17]. Detta gör det mest lämpligt att använda ett gyroskop, som mäter vridningar i olika riktningar, för att mäta robotgräsklipparens avvikelse från kursen [18].

I detta projekt väljs den digitala enheten MPU-9255, en tröghetsmätningseenhet (IMU), som innehåller gyroskop, accelerometer och kompass. Genom att fixera gyroskopets axel längst robotgräsklipparens bredd kan ett värde på robotgräsklipparens vinkel erhållas genom att integrera datan från gyroskopet. Denna vinkeln används vid återkopplingen i den yttre delen av reglersystemet som valdes i avsnitt 2.5.

Statiska och dynamiska hinder kan undvikas genom att använda olika sorters sensorer och andra komponenter som läser av omgivningen, som till exempel infraröda sensorer, ultraljudssensorer, stötsensorer, Light Detection and Ranging Systems (LIDAR), RADAR med flera. LIDAR och RADAR har hög mätsäkerhet men är kostsamma i förhållande till projektets budget och väljs därför bort [19]. Infraröda sensorer reagerar inte på transparenta föremål och lämpas därför inte för att upptäcka hinder [20].

Stötsensorer är idag vanligt förekommande i kommersiella robotgräsklippare och används för att detektera kollision. Stötsensorerna integreras med en mekanisk konstruktion som tillsammans utgör en stötfångare som aktiveras när robotgräsklipparen kolliderar med ett objekt. Vid kollision backar robotgräsklipparen ifrån hindret, roterar och kör åt ett annat håll. I detta projekt används två mikroswitchar av typen SS-5GL från OMRON som stötsensorer.

Ultraljudssensorer används som komplement till stötfångaren för att känna av hinder innan robotgräsklipparen kör in i dem. Detta gör det möjligt att sakta ner innan kollision vilket minskar slitage på både robotgräsklippare och omgivning. Kombinationen av stötsensor och ultraljudssensor ska resultera i att robotgräsklipparen uppfyller kravet att aldrig köra fast vid ett hinder. En ultraljudsgivare arbetar med korta, högfrekventa ultraljudsimpulser. Om dessa träffar ett objekt reflekteras impulserna tillbaka till sensorn. Med hjälp av löptiden mellan ljudsignalerna kan givaren avgöra avståndet till objekten och avge motsvarande signal på sensorns utgång [21]. På prototypen placeras ultraljudssensorer i fronten för att detektera föremål framför robotgräsklipparen. Ultraljudssensorernas mätvinkel behöver sammanlagt täcka ungefär 50 grader för att upptäcka alla föremål framför robotgräsklipparen inom 1 meters avstånd, då prototypen kommer vara ungefär 50 centimeter bred. Med krav på prototypens budget används 3 stycken ultraljudssensorer av den relativt billiga modellen HC-SR04 som har en mätvinkel på 15 grader.

Av säkerhetsskäl används infraröda sensorer för att känna av om robotgräsklipparen lyfts upp eller välter. Enligt SEK Svensk Elstandard ska klippsystemet stanna inom 2 sekunder då lyftsensorn aktiverats [22]. Infraröda sensorer har snabb responstid vilket gör de till attraktiva lyftsensorer [20]. Infraröda sensorer är vanligt förekommande för att mäta avstånd i olika tillämpningar. De använder en specifik ljussensor för att upptäcka ljusets våglängd i ett infrarött spektrum. Genom att mäta ljusintensiteten hos det reflekterande ljuset kan avståndet till ytan uppskattas. Prototypen i detta projekt har två diagonalt placerade infraröda sensorer från SHARP under robotgräsklipparen, vilka härnäst kommer benämnas som lyftsensorer.

2.6.5 Mikrokontroller för datahantering

För att styra motorerna utefter robotgräsklipparens tillstånd behövs en mikrokontroller som agerar hjärna i systemet. Samtliga sensorer är väldokumenterade inom programspråken C och C++ vilket gör det lämpligt att välja en mikrokontroller som är kompatibel med dessa programspråk. Vidare behövs en tillräckligt stor mängd portar för seriell kommunikation och för externa avbrott för att kunna läsa av och styra samtliga komponenter i systemet. På grund av den användarvänliga mjukvaran och tillräckligt antal portar för seriell kommunikation och externa avbrott används mikrokontrollen Arduino Mega 2560 Rev 3.

2.6.6 Klippaggregat

Klippaggregatet består av en klippmotor, klippdisk, knivar och en fästansordning för att montera disken på motoraxeln. Det finns även andra typer av klippanordningar [6].

Klippmotorerna som används i många hobbyprojekt är ofta borstlösa med en vinkelhastighet mellan 3000 [rpm] och 5000 [rpm], se tabell 2.3. En motor med lägre rpm kommer ha problem att klippa gräset och en motor med högre rpm ger i regel ifrån sig mer ljud. Som tidigare nämnt är en BLDC motor betydligt mer avancerad att styra än en borstad motor [14]. Eftersom motorn ska hålla konstant vinkelhastighet vid drift kommer den inte behöva styras på samma sätt som drivmotorerna, utan det räcker med att spänningen antingen är noll eller ett maximalt värde.

Ljudnivån och hållbarhet är två viktiga aspekter för tillverkare och hobbyentusiaster och är ett argument för att en borstlös klippmotor kan vara ett bättre val än en borstad trots den mer avancerade styrningen och högre kostnader [6].

Vilket maximalt moment som krävs hos motorn beror bland annat på gräsets höjd. Under säsongen klippas gräset regelbundet och gräsmattan vårdas snarare än klippas och därför ställs det generellt inga höga krav på motormoment för klippmotorerna.

Klippbredd avgörs av storlek på klippdisk med monterade knivar och varierar mellan kommersiellt byggda robotgräsklippare och hobbyprojekt. Husqvarnas robotgräsklippare har en klippdiameter mellan 170 [mm] och 240 [mm] och Ambrogios robotgräsklippare uppemot 290 [mm] [6]. I etablerade hobbyprojekt ligger klippbredden mellan 100 [mm] och 200 [mm].

Vanliga problem är att föremål på gräsmattan, exempelvis leksaker går sönder när robotgräsklipparen kör över dem eller att mindre hinder gör knivarna slöa. En lösning som finns på marknaden är att ha löst sittande rakbladsknivar, så kallade pivot-knivar. Dessa utnyttjar klippsystemets centripetalkraft vid klippning och viker undan vid kollision med föremål som inte är gräs [6]. Husqvarnas pivot-knivar används i projektet för att minska slitage på både knivar och eventuella föremål på gräsmattan.

Utifrån litteraturstudien erhöles god information om klippmotorer, dess specifikationer och övriga krav som ställs på dem. Många hobbyprojekt använder den borstlösa modellen Nidec 22H eller den kraftigare motorn som används i DIY Ardomower-projekten [23], se tabell 2.3.

Tabell 2.3: Specifikationer för två borstlösa klippmotorer som används i ett flertal hobbyprojekt

Specifikationer	Nidec 22H BLDC [24]	Ardomower motor [23]
Spänning	12 [V]	24 [V]
Vinkelhastighet	5000 [rpm]	3150 [rpm]
Maximalt moment	35 [mNm]	140 [mNm]
Effekt	4.6 [W]	46 [W]
Diameter rotationsaxel	4 [mm]	8 [mm]

Komponenter har erhållits via kontakten på Husqvarna, däribland klippmotor, klippdisk samt knivar. Klippmotorn har en effekt på 30 [W] vid nominell vinkelhastighet och är alltså ett mellanting av de två tidigare nämnda motorerna, där nominella vinkelhastigheten är 2300 [rpm]. Klippskivan är 210 [mm] och med knivar monterade uppnås en klippbredd på 240 [mm].

Då klippmotorn antingen ska gå i hög hastighet eller vara helt avstängd kan ett styrkort utan sensoringång användas. Ett så billigt styrkort som möjligt som samtidigt uppfyller de nödvändiga specifikationerna väljs p.g.a. målet av budgetens uppfyllnad. Det styrkort som väljs uppfyller de ovanstående egenskaperna och är en ESC med namnet ZTW Spider PRO 20A HV ESC.

2.6.7 Chassi för montering av komponenter

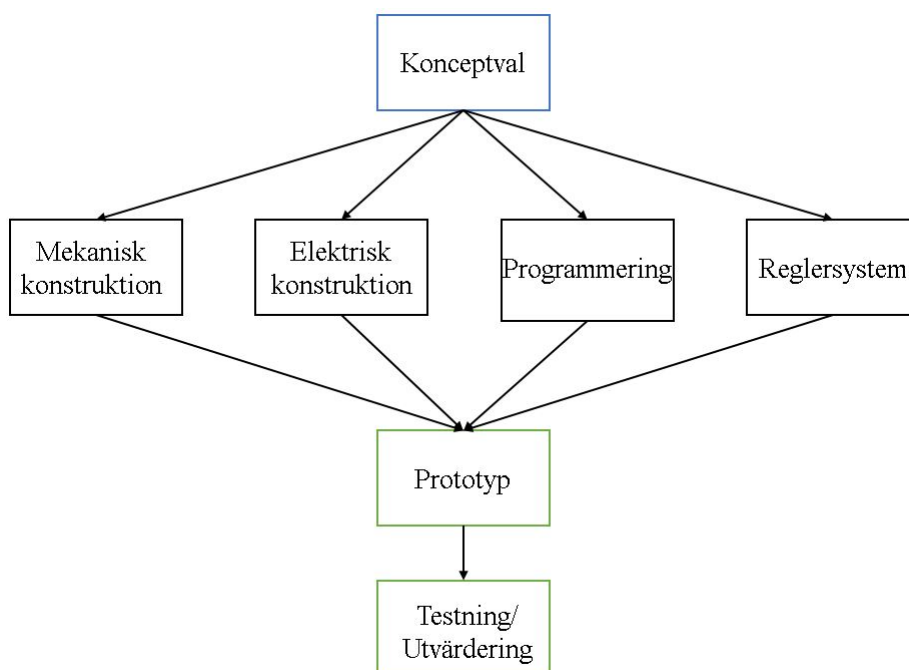
Chassits främsta uppgift är att fungera som plattform där de ovan nämnda komponenterna ska fästas och monteras. Chassit ska även skydda känslig elektronik. För att minska robotgräsklipparens vikt tillverkas chassit i aluminium. Bottenplattan fungerar som bas för batteri, elektronik, klipp- och stötfångaranordning. För att säkerhetställa att projektets specifika krav för lutningahantering tillverkas chassit från grunden. De tyngsta komponenterna placeras så centralt som möjligt för att bibehålla en lågt centrerad tyngdpunkt. Måtten på ramen bestäms utifrån kravspecifikationen i tabell 2.1 och då syftet är att bygga en prototyp tas inga estetiska faktorer i åtanke.

Efter handledning med forskningsingenjörerna i prototyplabbet på CTH fastställdes det att prototypen ska byggas som en fyrkantig låda för att spara tid och underlätta montering av sensorer.

3

Metod och genomförande

Detta kapitel beskriver tillvägagångssättet som används för att utveckla prototypen utifrån konceptvalen och den definierade kravspecifikationen. Dessutom beskrivs en testplan som skall resultera i hur väl prototypen uppnår kraven. Under framtagningen av prototypen löper mekanisk konstruktion, elektrisk konstruktion samt framtagning av programmeringskod och reglersystem parallellt med varandra. Dessa integreras när delarna anses tillräckligt kompletta. I figur 3.1 visas en schematisk bild av hur metoden för prototypframställningen går till.



Figur 3.1: Schematisk bild av arbetsgång vid prototypframställning

3.1 Mekanisk konstruktion

I detta avsnitt behandlas dimensioneringen och konstruktion av de centrala mekaniska komponenterna. Den mekaniska konstruktionens syfte är att hålla alla ingående elektriska komponenter på plats och till en viss grad även skydda dessa. Vidare behöver konstruktionen dimensioneras för att klara påverkande krafter från omgivningen och egentyngd. För att illustrera hur komponenterna ser ut och sammanfogas med varandra används CAD-modeller gjorda i CATIA V5.

3.1.1 Framtagning och montering av konstruktionsplåtar

Robotgräsklipparens chassi består av fem stycken konstruktionsplåtar som sammanfogas med nitar till en låda, se figur 3.2. För att uppfylla viktkravet på max 15 [kg] från kravspecifikationen i tabell 2.1 tillverkas plåtarna i aluminiumlegeringen 1050A på grund av materialets höga sträckgräns i förhållande till densitet. Sträckgränsen för 1050A är 145 [MPa] och densiteten 2710 [kg/dm³] [25].

För att inte plåtarna ska deformeras för mycket väljs plåttjockleken till 1,5 [mm]. Konstruktionsplåtarna skärs ut i en vattenskarare i prototypplabbet på CTH. CAD-modeller importerar till vattenskararen och skär ut plåtarna med hög noggrannhet. Plåtarna bockas för att öka styvheten och samtidigt skapa en yta som möjliggör nitning, se figur 3.2. Chassit försluts genom att en plexiglasskiva placeras ovanpå lådan. Plexiglaset fästs med kardborreband för enkel åtkomst till elektronikkomponenter.



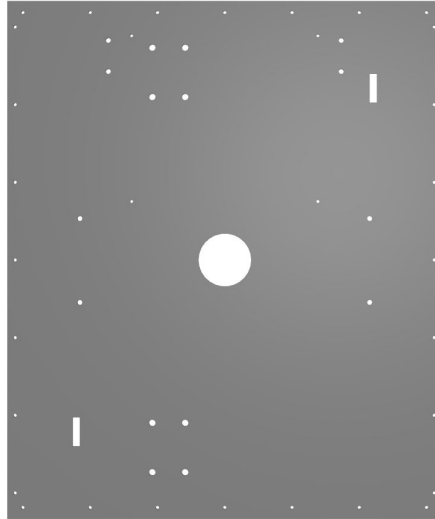
Figur 3.2: CAD-modell av konstruktionsplåtarna ihopmonterade

Bottenplåten fungerar som grund där batteri, klippmotor och IR-sensorer förankras. Dessutom monteras även en elektronikplatta på bottenplåten vars syfte är att hålla elektronikkomponenter som styrkort, mikrokontroller och säkringar på plats samtidigt som den dämpar eventuella vibrationer.

Målet är att få en låg centrerad tyngdpunkt för att robotgräsklipparen inte ska välta eller avvika från kurs vid körning i en brant backe. Enklare uppskattningar görs för att upprätthålla att tyngdpunkten centreras i största möjliga mån på bottenplattan. Fästen och hål ritas sedan ut efter det.

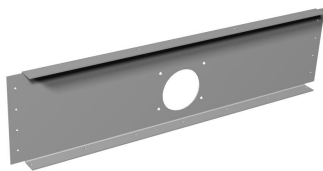
Bottenplattans ytermått bestäms till 500x420 [mm] för att hålla sig innanför de ansatta kraven 600x500 [mm], se kravspecifikationen i tabell 2.1. Dessa mått ligger till grund för dimensionering av de fyra olika sidorna. För att uppnå en välbalanserad

tyngdpunkt kring prototypens mitt placeras elektronikplattan framtill och batteri baktill. Bottenplattans hålbild visas i figur 3.3 där det centrerade hålet är för klippmotorn och de rektangulära hålen är avsedda för lyftsensorerna.

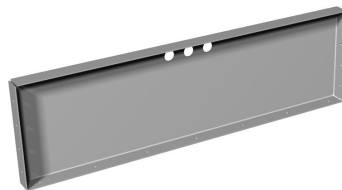


Figur 3.3: CAD-modell av bottenplåten visad ovanifrån

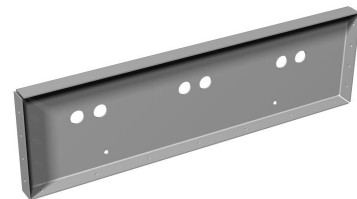
Sidornas funktion är att bilda en ram som ökar konstruktionens stabilitet samtidigt som de skyddar invändiga komponenter och ger utrymme för montering av drivmotorer, strömbrytare samt ultraljudssensorer. På de två plåtarna som utgör prototypens sidor placeras motorfästen, se figur 3.4. Hålets centrum placeras så att sidohjulets diameter passar in med stödhjulen. På baksidan placeras tre strömbrytare som används för att stänga av och på drivmotorer, klippmotor och Arduino, se figur 3.5. Slutligen har framsidan hål för tre ultraljudssensorer som kräver två hål vardera. För de två stålstängerna som går till stötsensorn görs även två mindre hål på framsidan, se figur 3.6.



Figur 3.4: Sidoplåt

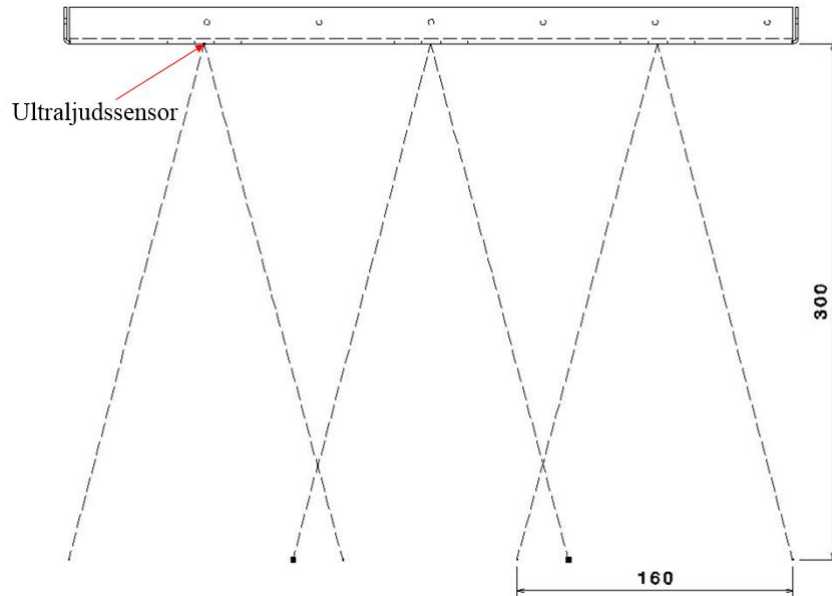


Figur 3.5: Baksida



Figur 3.6: Framsida

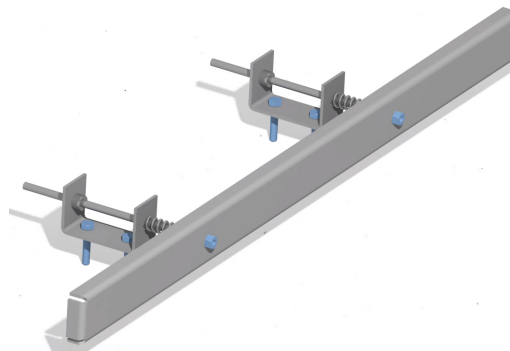
Ultraljudssensorernas synvinkel är 15 grader och hålen placeras så att synfältet täcker robotgräsklipparens bredd. Beräkningar utförs så att sensorerna ska upptäcka ett föremål 300 [mm] framför prototypen vilket ger ett synfältet enligt figur 3.7.



Figur 3.7: Illustration av ultraljudssensorernas synfält

3.1.2 Beräkningar och konstruktion av stötfångare

Stötfångarens funktion är att absorbera kollisionskraften samtidigt som stötsensorerna aktiveras för att stänga av drivmotorerna. Stötfångarens ram konstrueras i aluminiumlegeringen 1050A med 2 [mm] tjocklek och samtliga sidor bockas in 10 [mm] för att höja stabiliteten och minska risken för större deformationer vid kollision [25]. Två U-formade aluminiumprofiler bockas till och fästs i bottenplattan. Slutligen löper två stålstänger igenom de U-formade fästena som sammanfogas i stötfångarens ram, se figur 3.8.



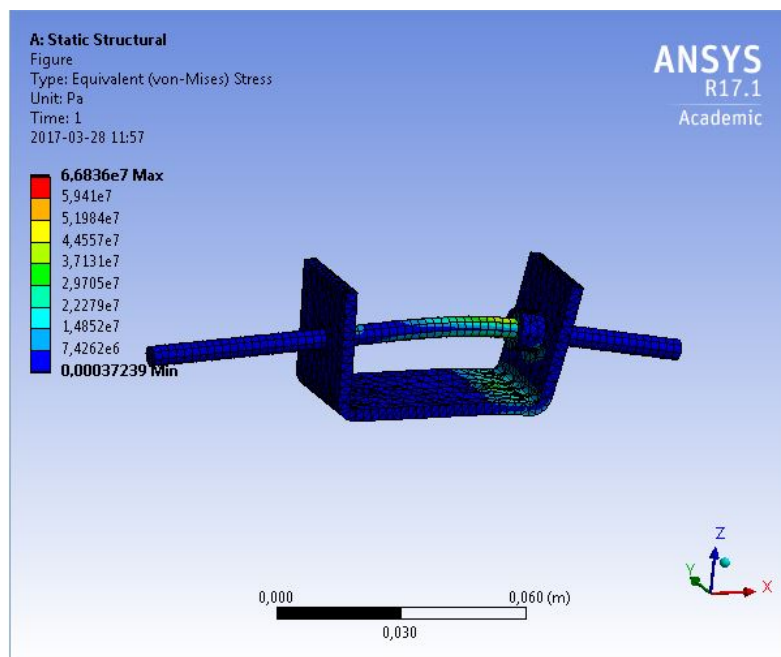
Figur 3.8: CAD-modell över stötfångarens ingående komponenter

De två stålstångerna som aktiverar stötsensorerna kan förskjutas maximalt 5 [mm] innan vidare förskjutning förhindras av att en låsring, som sitter på stängerna, kommer i kontakt med det U-formade stötfångarfästet. Således skyddas stötsensorerna från att deformeras av stängerna. Två fjädrar placeras mellan stötfångarens ram och det U-formade fästet vars funktion är att forcera tillbaka stötfångaren efter kollision vilket resulterar i att stötsensorerna tappar kontakt och avaktiveras.

Eftersom stötfångaren kommer ta upp all kraft vid kollision är hållfasthetsberäkningar nödvändiga för att dimensionera komponenten. Kraften som appliceras på stötfångarna beräknas genom att använda Newtons andra lag. Massan på robotgräsklipparen anses vara cirka 10 [kg] och vid kollision tar det approximativt 0,05 sekunder att gå från hastigheten 0,5 [m/s] till stillastående vilket ger en deacceleration $a = -10 [m/s^2]$. Kollisionskraften som stötfångaren upplever blir då

$$F_{krock} = ma = 100 \text{ N} \quad (3.1)$$

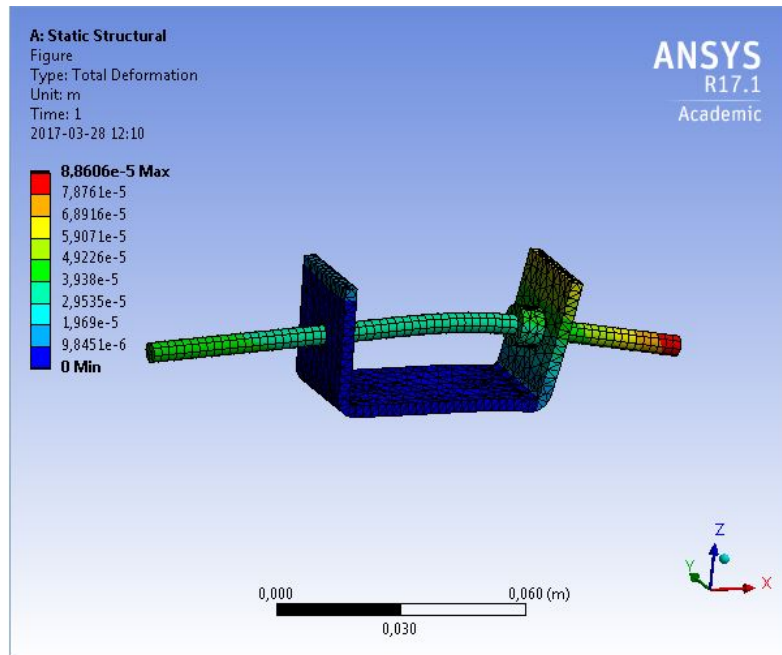
Med den beräknade kollisionskraften analyseras effektivspänningarna och deformationen i beräkningsprogrammet ANSYS Workbench för att undersöka eventuella kritiska punkter. I figur 3.9 noteras att den maximala effektivspänningen som uppstår i stången är 66,8 [MPa] och sker vid det gulmarkerade området ovanpå stången. Då stången tillverkas i stål S235JR med en sträckgräns på 235 [MPa] erhålls en säkerhetsfaktor 3,52 [26].



Figur 3.9: Ansysberäkning av effektivspänning enligt Von Mises [27]

3. Metod och genomförande

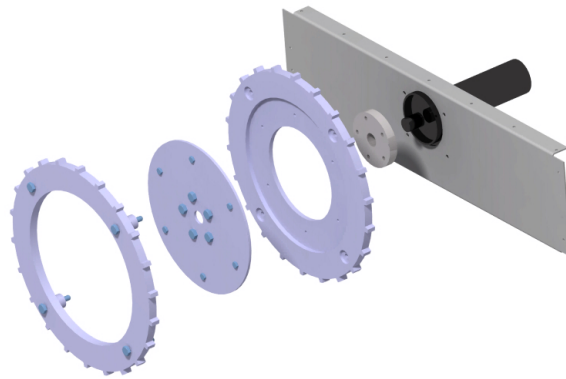
I figur 3.10 visas deformationen vid en belastning på 100 [N] där deformationen visas i färgskalan till vänster. Deformationen är störst vid stångens röd markerade ände. Det ska observeras att deformationerna inte är skalenligt presenterade. Det är en visuell överdrift för att få en idé på vilket sätt komponenten deformeras. Deformationerna är mindre än 90 [μm] när de U-formade fästena har en tjocklek på 3 [mm] och skulle annars inte kunna urskiljas.



Figur 3.10: Ansysberäkning av deformation vid en belastning på 100 N

3.1.3 Hjul och motorfästen

Drivhjulen är utskrivna i en 3D-skrivare i termoplasten Polylaktid (PLA). Hjulens ytterdiameter är 240 [mm] och dess bredd är 30 [mm]. För att minimera vikten delas vardera hjul upp i två hjulsegment som sammanfogas med fyra skruvar med distanseringar, vilket visas till vänster i figur 3.11. Ett högre tryck mot marken erhålls med mindre kontaktyta jämfört med om hjulet hade varit helt solid, detta ger i sin tur dubbarna bättre fäste i gräset. På det innersta hjulsegmentet fästes en aluminiumskiva som monteras på en fläns. Flänsens funktion är att ta upp de skjuvspänningar som uppstår från hjulets rotation för att minska belastningen på motoraxeln. Flänsen monteras slutligen på BLDC motorn. I figur 3.11 visas en sprängvy över drivhjulen och deras montering.



Figur 3.11: Sprängvy över drivhjulens montering

De två stödhjulen monteras 60 [mm] från robotgräsklipparens centrumlinje och har en bygghöjd på 54 [mm]. Anledningen till varför stödhjulen inte placeras i mitten av robotgräsklipparen är för att förhindra robotgräsklipparen från att enbart balansera på stödhjulen. Detta kan resultera i att drivhjulen förlorar kontakt med marken vid ojämn terräng. För att ytterligare försäkra sig om att drivhjulen alltid har kontakt med gräsmattan dimensioneras stödhjulen med lägre bygghöjd än drivhjulen så att det på plan mark enbart är möjligt att ett stödhjul har kontakt med marken samtidigt.

3.2 Elektrisk konstruktion

I detta avsnitt presenteras robotgräsklipparens elektriska konstruktion. Den kan delas upp i ett drivsystem och ett signalsystem. Drivsystemets uppgift är att ge effekt till driv- och klippmotorerna utifrån data från signalsystemet.

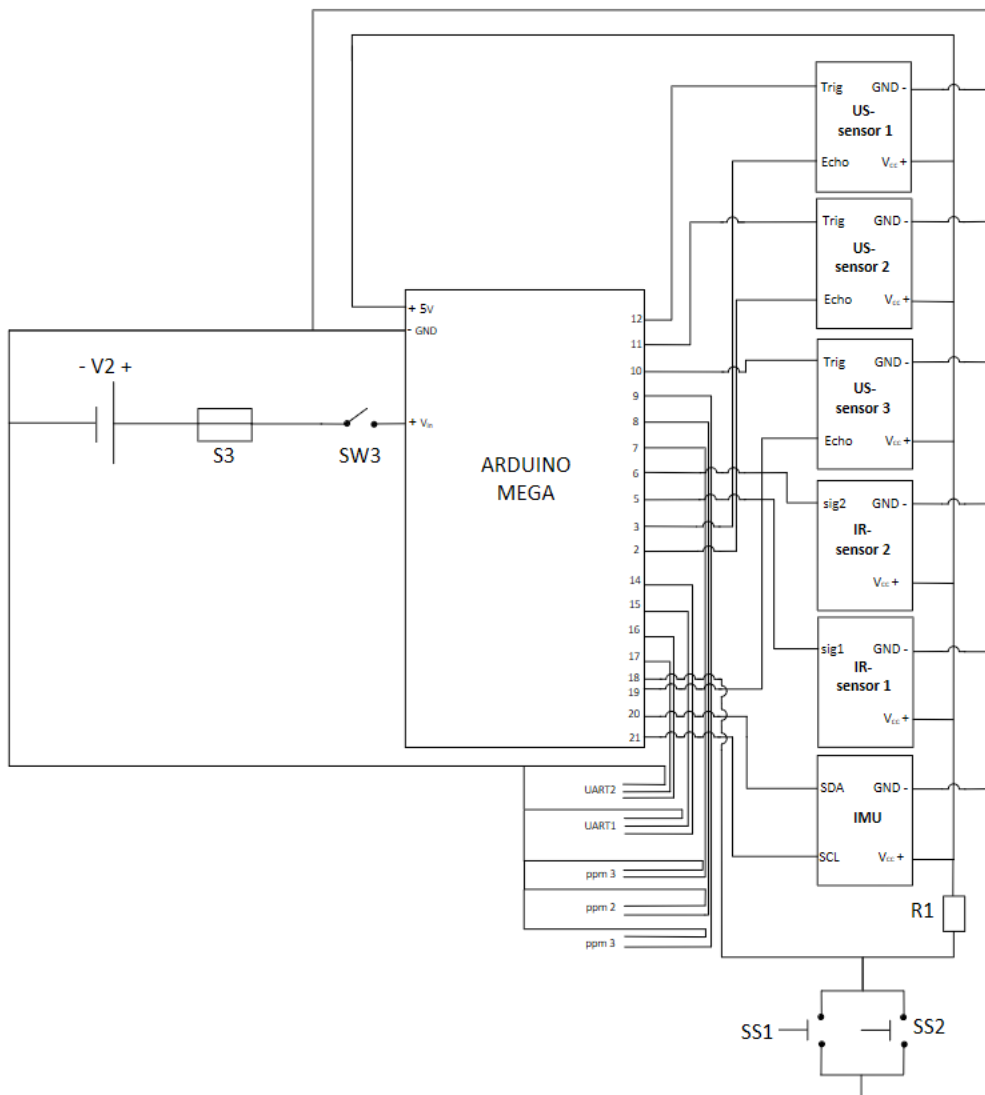
3.2.1 Signalsystem

Signalsystemet tar indata från omgivningen med hjälp av sensorer och processerar denna i mikrokontrollen för att sedan skicka information om hur drivsystemet ska

3. Metod och genomförande

uppföra sig. Den valda mikrokontrollern Arduino Mega, tre ultraljudssensorer, två infraröda sensorer, ett gyroskop, två stötsensorer (SS) och en mindre spänningskälla utgör tillsammans signalsystemet. Stötsensorerna kopplas parallellt med varandra för att enbart ockupera en port på Arduinon. I serie med stötsensorerna kopplas även en resistor R1 med resistansen $10\text{ [k}\Omega\text{]}$.

Mikrokontrollern behöver en rekommenderad inspanning mellan 7 och 12 [V] och spänningskällan väljs till ett 9V-batteri [28]. Signalsystemet har dessutom en trög säkring (S) på 2 [A] för att skydda mikrokontrollern och en switch (SW) för att enkelt kunna aktivera och deaktivera signalsystemet. Kopplingsschemat för signalsystemet visas i figur 3.12.

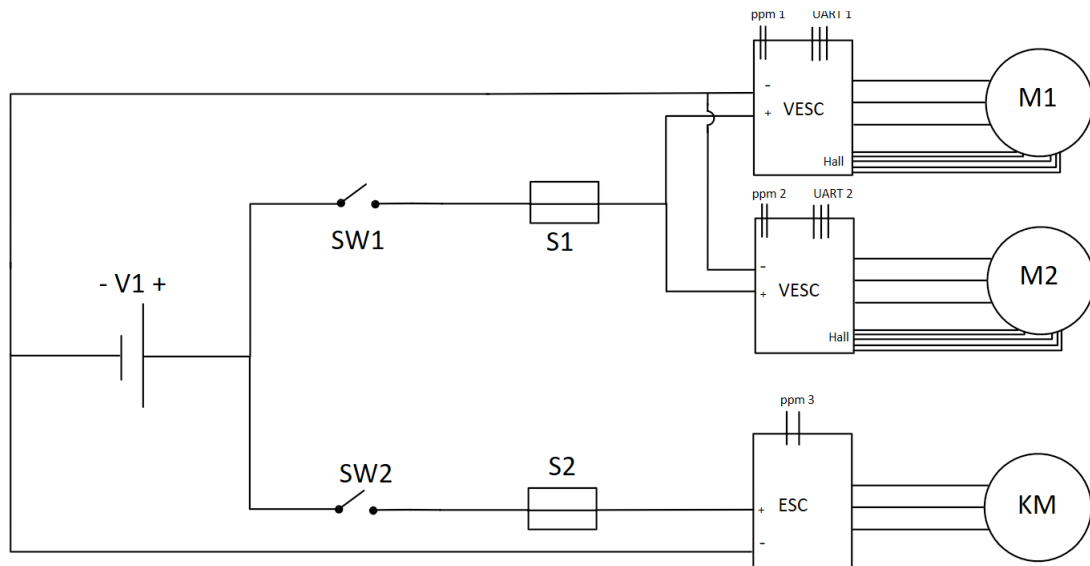


Figur 3.12: Elektriskt schema för robotgräsklipparens signalsystem.

3.2.2 Drivsystem

Drivsystemets uppgift är att driva hela systemet och består av klippmotor med tillhörande styrkort, två drivmotorer med två tillhörande styrkort av typ VESC, två switchar, två säkringar och ett batteri. Enligt drivmotorernas specifikationer kan de maximalt dra 7 [A], se appendix C. Klippmotorn är specificerad till 30 [W], vilket med en batterispänning på 18 [V] innebär att den inte drar mer än 2 [A]. Detta innebär att drivsystemet maximalt kan dra 16 [A]. Utifrån erfarenhet valdes därför en kabelarea på 2.5 [mm²].

Säkringar placeras innan VESC-styrkortet och innan klippmotorns styrkort. Dessa ska lösa ut vid eventuell kortslutning för att skydda styrkortet och dimensioneras därför till tröga säkringar på 16 [A]. Batteriet monteras med kardborreband för att möjliggöra enkel borttagning vid laddning. Kopplingsschemat för drivsystemet finns i figur 3.13.



Figur 3.13: Elektriskt schema för robotgräsklipparens drivsystem.

Konfiguration av drivmotorernas styrkort VESC

Som tidigare nämnts används VESC-styrkort för att styra robotgräsklipparens drivmotorer. För att konfigurera hur de ska styra motorerna finns en användarvänlig programvara som heter BLDC Tool. I verktyget går det bl.a. att ställa in motor- och applikationskonfigurationer. Samtliga konfigurationer finns listande i appendix D.

Eftersom strömmen genom motorn inte får överstiga 7 [A] ställs en strömbegränsning på 6 [A], både för positiv och negativ ström, in i BLDC Tool. För att batteriet inte ska ta skada av alltför kraftig urladdning ställs en lägre gräns för spänningen från batteriet in.

Tidigare, i avsnitt 2.6.2, nämndes att FOC-styrning av BLDC motorer är fördelaktigt eftersom det är mer effektivt. I BLDC Tool kan motorparametrarna identifieras genom att programvaran utför tester. Med hjälp av dessa parametrar kan programvaran styra motorerna genom FOC styrning. Även hallsensorernas position mäts upp med hjälp av programvarans tester.

VESC kan styras av flera olika typer av applikationer. Klippmotorns styrkort använder sig av Pulse Position Modulation (PPM) och därför väljs denna metod även för drivmotorerna. PPM är en av de vanligaste modulationsmetoderna. Informationen som förs över representeras i form av signalers position i ett förbestämt tidsintervall [29]. För att kunna kommunicera med mikrokontrollern, exempelvis vilken hastighet motorn har för nuvarande, används också Universal Asynchronous Receiver Transceiver (UART).

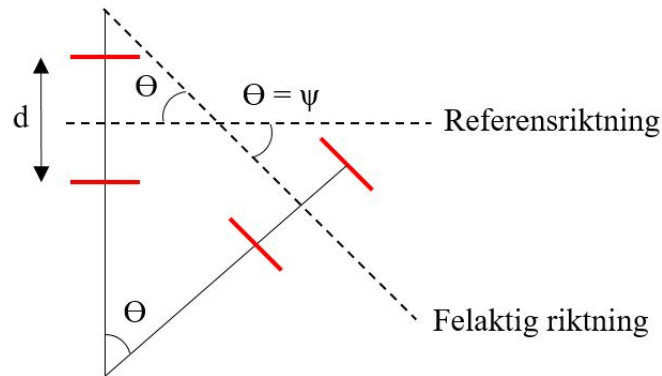
Klippmotor och ESC

Vid implementeringen av klippmotorns styrkort visade det sig att den var defekt. Felet identifierades då inskickade PPM signaler resulterade i ett ryckande beteende hos motorn. Styrkortet reklamerades och en ny enhet erhöles, men den uppvisade samma problematik. Vid inkoppling av det andra styrkortet, VESC, som används till drivmotorerna, fungerar klippmotorn som tänkt. En anledning till detta kan vara bristande kvalitet på det felande styrkortet.

Då fokus i projektet inte ligger i att prototypen ska klippa gräs och p.g.a. tidsbrist och budget bestäms därför att inget nytt styrkort köps in. Detta beslut tas då problemet inte anses påverka projektets syfte i någon större utsträckning.

3.3 Framtagning av reglersystem

Ett reglersystem är nödvändigt för att robotgräsklipparen ska bibehålla rak kurs oberoende lutning eller terräng. Enligt argumentationen i delavsnitt 2.6.4 används en avvikelsevinkel för att behålla kursen. Avvikelsevinkeln ψ definieras enligt figur 3.14 och ska ha ett börvärde $\psi = 0$. Reglersystemet är dimensionerat att klara det uppsatta kravet på 20 graders lutning, enligt kravspecifikationen i tabell 2.1.

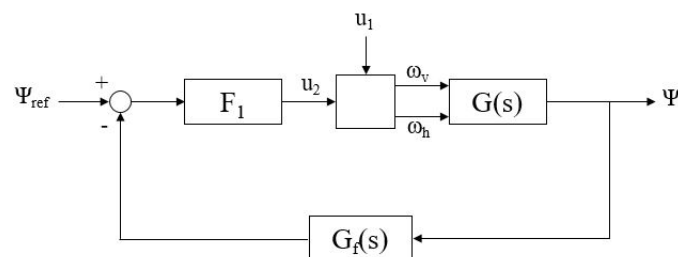


Figur 3.14: Illustration av avvikelsevinkeln ψ

Två olika sorters delsystem ska samverka i systemet, vilket tidigare nämndes i avsnitt 2.5. För det första sätts ett återkopplat reglersystem upp för att reglera avvikelsevinkeln ψ . Vidare behövs även en hastighetsreglering som ser till att vardera hjul har önskad vinkelhastighet eftersom robotgräsklipparens riktning justeras genom differentialstyrning, d.v.s. genom att ändra vinkelhastigheterna på hjulen.

3.3.1 Reglering av vinkel för att hålla rak kurs

Varje gång robotgräsklipparen gjort en kursändring på grund av ett hinder ansätts en referensriktning som robotgräsklipparen förhåller sig till vid körning. För att hålla rak kurs ska vinkeln ψ mellan utsatt referensriktning och robotgräsklipparens aktuella körriktning vara noll. Ett återkopplat system med en regulator F_1 tillämpas för att reglera vinkeln ψ enligt figur 3.15. I den återkopplade delen placeras ett lågpasfilter G_f vars funktion är att filtrera bort störningar på ärvärdet ψ .



Figur 3.15: Blockschema över regleringen av vinkeln ψ

Styrsignalerna för att reglera vinkeln ψ är u_1 och u_2 , där u_1 är medelvinkelhastigheten för hjulen och u_2 är skillnaden i vinkelhastighet mellan hjulen. Styrsignalerna definieras nedan där index v står för *vänster hjul* och index h står för *höger hjul*.

$$u_1 = \frac{\omega_v + \omega_h}{2} \quad (3.2)$$

$$u_2 = \omega_v - \omega_h \quad (3.3)$$

Utifrån ekvationerna (3.2) och (3.3) kan nu vinkelhastigheterna för respektive hjul skrivas som

$$\omega_h = u_1 - \frac{u_2}{2} \quad (3.4)$$

$$\omega_v = u_1 + \frac{u_2}{2} \quad (3.5)$$

Överföringsfunktionen för robotgräsklipparen $G(s)$ härleds i appendix E och är

$$G(s) = \frac{1}{s} \frac{R_{hj\ddot{u}l}}{d} \quad (3.6)$$

där $R_{hj\ddot{u}l}$ är drivhjulets radie och d är avståndet mellan drivhjulen. Eftersom $G(s)$ är integrerande i sig behövs ingen integrerande regulator och därifrån ansätts en P-regulator $F_1 = K_{p1}$.

Överföringsfunktionen för hela det återkopplade systemet mellan börvärdet ψ_{ref} och ärvärdet ψ ges av

$$G_{\psi_{ref}\psi} = \frac{K_{p1}G}{1 + G_f K_{p1}G} \quad (3.7)$$

där G_f är överföringsfunktionen för ett Butterworth-filter i kontinuerlig tid. Denna ges av

$$G_f = K \frac{\omega_{c,BW}}{s + \omega_{c,BW}} \quad (3.8)$$

där $\omega_{c,BW} = 2\pi F_c$. K bestämmer magnituden av Butterworth-filtret och gränsfrekvensen F_c bestämmer vilka frekvenser som ska filtreras bort.

För att få ett insignal-utsignal-stabilt system ska regulatorparametern K_{p1} väljas så att polerna till överföringsfunktionen (3.7) är strikt negativa. Polerna ges av

$$1 + G_f K_{p1}G = 0 \quad (3.9)$$

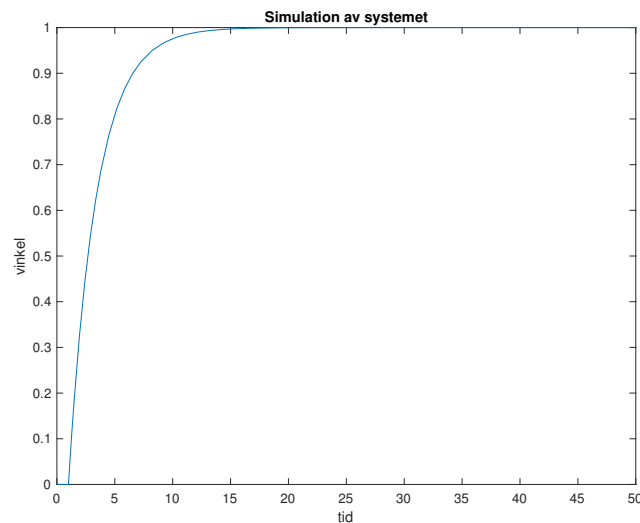
Ekvationerna (3.6) och (3.8) insatt i ekvation 3.9 ger nu

$$s^2 + \omega_{c,BW}s + K K_{p1} \omega_{c,BW} \frac{R_{hj\ddot{u}l}}{d} = 0 \quad (3.10)$$

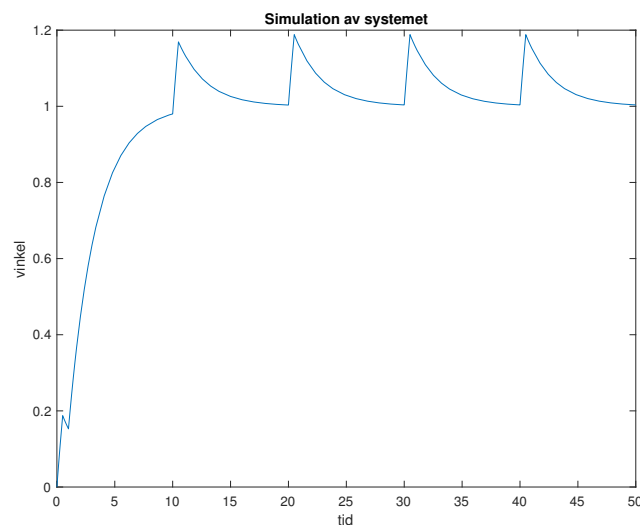
Eftersom alla polynomkoefficienter i ekvation (3.10) är positiva kommer systemet alltid vara insignal-utsignal-stabilt då K_{p1} är positiv. Då felet $\psi - \psi_{ref}$ kommer vara relativt litet väljs ett litet K_{p1} för att inte riskera att få översläng. $K_{p1} = 2$ ansattes initialt och optimerades sedan till $K_{p1} = 1$ genom experimentella tester.

3.3.2 Simulering av vinkelreglering

För att i ett tidigt skede kunna undersöka om den tänkta ovanstående vinkelregleringen fungerar utförs enkla simuleringar. Reglersystemet sätts upp i Simulink och körs med ett tidsförlopp på 50 sekunder, se appendix F. Första simuleringen är en stegformad börvärdesändring på 1° som illustreras i figur 3.16. I andra simuleringen, se figur 3.17, läggs en puls på innan den matematiska modellen för robotgräsklipparen. Pulsen ska representera störningar som kan uppkomma på robotgräsklipparen i form av exempelvis mindre gropar eller stenar på gräsmattan. Båda simuleringarna visar att robotgräsklipparen reglerar sin vinkel korrekt och kommer tillbaka till ursprungsläget efter en störning inom rimlig tid.



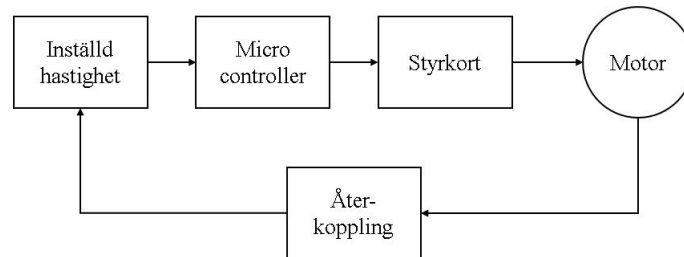
Figur 3.16: Simulering av systemet



Figur 3.17: Simulering av systemet och hur pulserande störningar motverkas

3.3.3 Reglering av motorernas hastighet

Målet med systemet är att använda den avlästa hastigheten på motorerna, återkoppla denna och reglera insignalen till motorerna tills dess att rätt hastighet uppnås. En övergripande bild av hur systemet ser ut visas i figur 3.18.

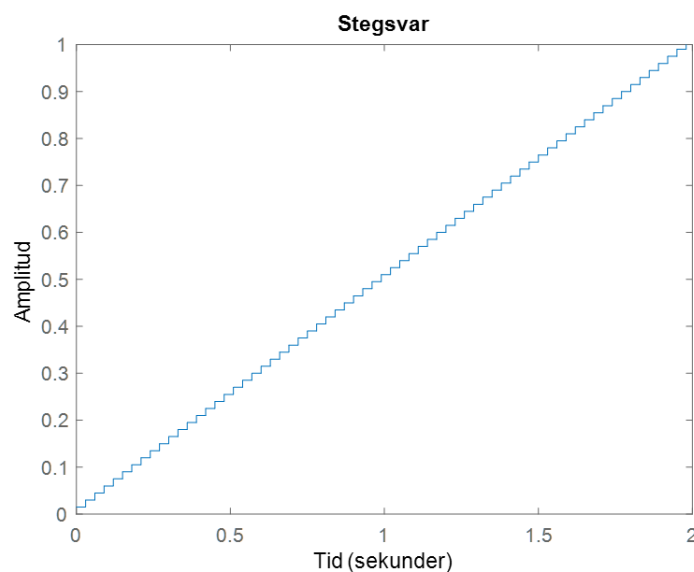


Figur 3.18: Schematisk bild av motorernas regelsystem

Problemet med att stanna och starta i brant backe löses genom att hastigheten på hjulen stegvis ökas så att hjulen ej börjar slira mot underlaget. Lösningen implementeras genom att integrera upp önskad hastighet ω tills den når en målhastighet ω_x enligt

$$\omega[t] = \omega[t - 1] + a_0\omega_x[t] \quad (3.11)$$

där a_0 är en godtycklig konstant. Genom att ansätta a_0 till halva sampelhastigheten uppnås målvärdet efter 2 sekunder. Stegsvaret för funktionen visas i figur 3.19. Resultatet är att hastigheten stegvis ökar under 2 sekunder och på så sätt får robotgräsklipparen en lugn start. Signalen ω ut från funktionen går sedan in som börvärdessignal till motorernas hastighetsreglering. När målvärdet är uppnått slutar funktionen att köras. Signalen används endast vid de tillfällen då en mjuk start är önskad från stillastående läge.



Figur 3.19: Stegsvaret för funktionen som stegvis ökar hastigheten

Vidare implementeras en funktion liknande ekvation (3.11), där additionen ersätts med en subtraktion. Detta resulterar i en nedrampmning, som används då robotgräsklipparens ultraljudssensorer identifierar ett objekt och ska sänka hastigheten.

En BLDC motor modelleras med två stycken linjäriserade ekvationer,

$$U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + k_e \omega \quad (3.12)$$

$$T = k_t I_a \quad (3.13)$$

där de olika parametrarna beskrivs i Appendix C. Genom att använda Newtons lag för roterande system beskrivs den mekaniska modellen för hjulet när det roterar fritt i luften enligt

$$J_{tot} \frac{d\omega(t)}{dt} = T - b\omega(t) \quad (3.14)$$

J_{tot} representerar hjulets sammanlagda tröghetsmoment, som hämtas utifrån CAD-modellerna, och $b\omega$ representerar ett bromsande friktionsmoment i växellådan. För att bestämma överföringsfunktionen från spänning u till hjulets varvtal ω Laplace-transformeras alla ekvationerna (3.12), (3.13) och (3.14). Överföringsekvationen blir slutligen

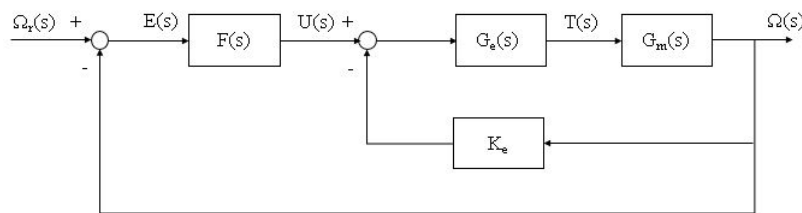
$$G_{u\omega} = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{G_m G_e}{1 + G_m G_e K_e} \quad (3.15)$$

$$G_m = \frac{1}{b + J_{tot}s} \quad (3.16)$$

$$G_e = \frac{1}{\frac{1}{K_t}(R_a + L_a s)} \quad (3.17)$$

Det återkopplade systemet illustreras med ett blockschema i figur 3.20. Parametrarna i PI-regulatorn väljs så att systemet blir stabilt och får en snabb insvängning mot börvärdet. Den snabba insvängningen är nödvändig för att systemet ligger inne i vinkelregleringen som beskrivs ovan. Dessutom krävs en snabb reglering för att robotgräsklipparen skall kunna stanna och hålla hastigheten noll i brant backe. Utifrån argumentationen ovan och motorparametrarna i appendix C beräknas K_p och K_i , se appendix G, och därmed regulatorn

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad \text{med } K_p = 0,2 \text{ och } K_i = 4,0 \quad (3.18)$$



Figur 3.20: Blockschema över hastighetsreglering av drivmotorerna

PI-regulatorn appliceras sedan i programmeringskoden för drivsystemet vilket beskrivs under nästkommande avsnitt. Utifrån de första testerna justeras sedan K_p för att robotgräsklipparen skall kunna stanna och stå stilla i backe. Värdet bestämdes experimentellt då till 0,5.

3.4 Programmering av robotgräsklipparen

Signalsystem, drivsystem och reglersystem kopplas samman och styrs av en mikrokontroller av typen Arduino Mega 2560 Rev 3. Denna kontrolleras i sin tur av kod skriven i Arduino sketch, C och C++.

3.4.1 Kodens uppbyggnad

Koden är i stort sett uppdelad i tre partier som består av konfiguration, komponenter och reglersystem.

Robotgräsklipparen konfigureras genom en inkluderingsfil som innehåller definitioner av viktiga parametrar som påverkar hur resterande kod styr robotgräsklipparen.

Samtliga komponenter som används för att styra robotgräsklipparen hanteras i C++. Dessa innefattar gyroskop, motorer, sensorer och ytterligare en klass som bestämmer börvärdet som skickas in till reglersystemet baserat på robotgräsklipparens tillstånd.

Reglersystemet i form av en yttre P-regulator för vinkelregleringen och två inre PI-regulatorer för hastighetsregleringen är skrivna i Arduinos egna variant av C++ och skickar styrsignalerna till motorerna.

Mer information om exakt hur samtliga komponenter fungerar och inrättas samt hur reglersystemet ser ut finns i appendix H.

3.4.2 Implementation av reglersystemet

Det definierade reglersystemet är tidskontinuerligt vilket innebär att styrsignalen, ärvärdet och börvärdet uppdateras och läses av kontinuerligt. Detta medför vissa problem då mikrokontrollern som används för att implementera reglersystemet arbetar tidsdiskret. Det innebär att mikrokontrollen utför samtliga instruktioner som finns i ett varv i reglersystemet med en viss frekvens, vilken bestäms utefter hur snabb processorn och dynamiken hos processen är.

För att implementera reglersystemet i mikrokontrollen så approximeras differentialekvationerna som beskriver regulatorerna till differensekvationer. P-regulatorerna i reglersystemet ges av

$$P[t] = K_p \cdot e[t] \quad (3.19)$$

där K_p är den framtagna parametern för vardera regulator och $e[t]$ är felet mellan ärvärdet och börvärdet i nuvarande tidpunkt. I-regulatorn ges av Euler framåt enligt

$$I[t + 1] = I[t] + \Delta t \cdot K_i \cdot e[t] \quad (3.20)$$

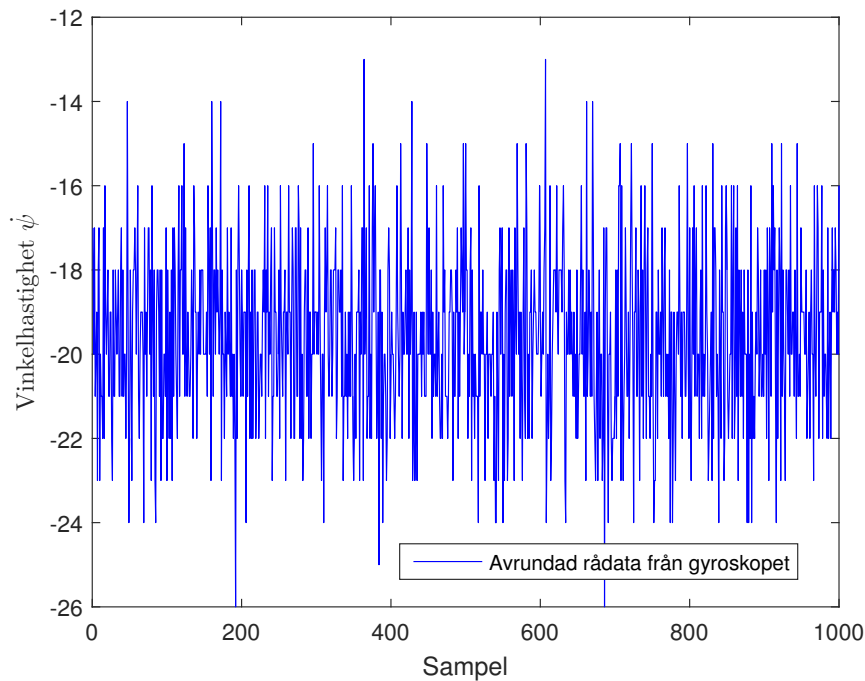
där K_i är den framtagna parametern för I-verkan i de inre regulatorerna och Δt är samplingsperioden. Styrsignalen beräknas sedan med enligt

$$U[t] = P[t] + I[t] \quad (3.21)$$

3.4.3 Implementation av gyroskop

Gyroskopet har i uppgift att hämta information om hur mycket robotgräsklipparens riktning ψ skiljer sig från den önskade riktningen, se figur 3.14.

Datan från gyroskopet beskriver vinkelhastigheten $\dot{\psi}$ i tre axlar. Genom att integrera datan över vinkelhastigheten från önskad axel fås utsignalen ψ som beskriver den riktning som robotgräsklipparen har. I figur 3.21 visas rådata över vinkelhastigheten i 1000 punkter från gyroskopet i den önskade axeln när robotgräsklipparen står stilla.



Figur 3.21: Rådata över vinkelhastigheten $\dot{\psi}$ från gyroskopet i stillastående läge

I figuren framgår det att rådatan innehåller mätstörningar vilket kräver filtrering samt att rådatan behöver kompenseras med en förskjutning i y-led.

Förskjutningen i y-led åstadkommes genom att kalibrera gyroskopet, vilket görs genom att räkna ut den genomsnittliga avvikelsen från 1000 sampel. För att säkerhetsställa att förskjutningen inte ändras görs en ny kalibrering varje gång robotgräsklipparen ändrar kurs.

För att filtrera rådatan från gyroskopet kan butterworthfiltret från delavsnitt 3.3.1 implementeras i diskret tid genom att omvandla den till ett IIR filter. P.g.a. IIR filtrets komplexa implementation, används istället ett FIR filter med liknande egenskaper som butterworthfiltret. Ett första ordningens FIR filter ges på diskret form av

$$y_f[t] = b_0x[t - 1] + b_1x[t] \quad (3.22)$$

där b_0 och b_1 är konstanter och kan bestämmas med en önskad gränsfrekvens. Genom tester av olika gränsfrekvenser bestäms både b_0 och b_1 till 0.5. För att erhålla enheten grader per sekund tillägs vidare en förstärkning på -24.32 [dB].

Slutligen, för att erhålla den önskade avvikelsevinkeln ψ integreras den filtrerade datan $\dot{\psi}$ i diskret tid enligt

$$\psi[t] = \psi[t - 1] + \Delta t \dot{\psi}[t] \quad (3.23)$$

3.4.4 Implementation av ultraljudsensor

Robotgräsklipparens tre ultraljudssensorer ska minska dess hastighet då det finns föremål framför robotgräsklipparen.

Sensorerna är implementerade genom att en avbrottsrutin skickar ut ljudimpulser fem gånger per sekund. Vardera sensor är kopplad till ett stift på mikrokontrollen som ger utslag då en sensor tar emot ett eko från en ljudimpuls. Tiden det tar från det att en ljudimpuls skickas tills dess att den tas emot motsvarar ett avstånd. Detta multipliceras sedan med en konstant för att få reda på hur långt avståndet är i centimeter.

Då avståndet understiger 50 [cm] kommer referenshastigheten i reglersystemet rampas ned enligt den funktion som beskrivs i delavsnitt 3.3.3. Robotgräsklipparens hastighet kommer då minska.

3.4.5 Implementation av stötsensor

Robotgräsklipparen har två stötsensorer som ska hantera kollisioner. När en stötsensor aktiveras skickas en signal till ett stift på mikrokontrollen. Stiftet är kopplat till en avbrottsrutin som omedelbart stannar, backar och vänder robotgräsklipparen. Detta gör den genom att skicka nya börvärden för hastighet och vinkel.

3.4.6 Implementation av infraröd sensor

Robotgräsklipparen har två infraröda sensorer som stänger av motorerna då den lyfts upp. De infraröda sensorerna är kopplade till varsitt stift på mikrokontrollen som vid avläsning ger ett avstånd. Då avståndet är för stort kommer samtliga motorer på robotgräsklipparen stängas av.

3.5 Testplan

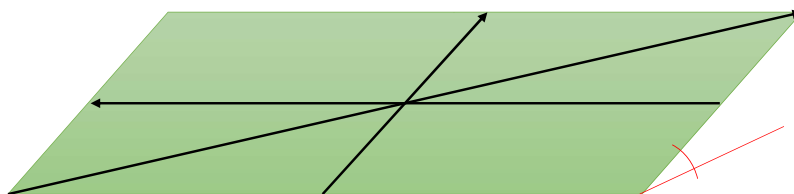
Syftet med testningen är att verifiera att kraven i kravspecifikationen, som finns i tabell 2.1, uppfylls samt hur väl de uppfylls av prototypen. Genomförandet av de olika testen varierar från krav till krav och presenteras därför överskådligt i detta avsnitt.

3.5.1 Val av testmetod

Kravspecifikationen i tabell 2.1 används som grund till att kontrollera prototypen. Specifikationerna i kravspecifikationen delas upp i olika testgrenar. De triviala testerna är där resultatet antingen är observerbart eller kan testas på ett enkelt sätt med hjälp av enkla redskap såsom en mätsticka eller tidtagarur. Ett exempel är om drivmotorerna stannar inom 1 sekund vid kollision eller undersökning om prototypen uppfyller de specificerade dimensionerna. De icke triviala testerna kräver en mer komplicerad mätmetod. Det är endast dessa tester som kommer att beskrivas i detalj. Nedan följer de specifikationer som ses som icke triviala.

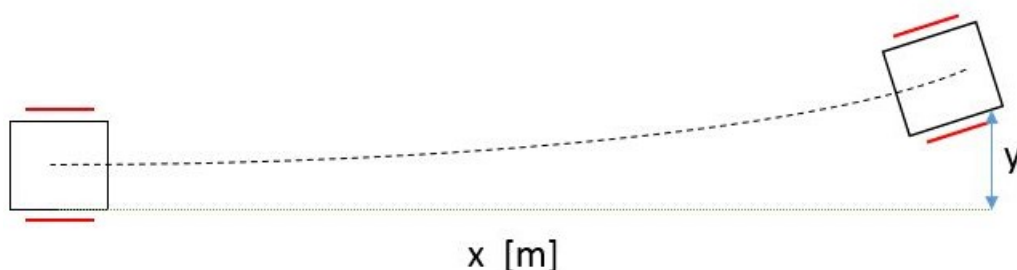
- Maximal avvikelse från riktning efter 10 [m] körsträcka på torrt gräs vid 0 grader lutning
- Maximal avvikelse från riktning efter 5 [m] körsträcka på torrt gräs vid lutning >20 grader
- Framkomlighet på torrt gräs vid lutningar >20 grader utan slirning

För att mäta avvikelsen från referensriktningen efter 10 [m] körsträcka på plan mark samt efter 5 [m] i lutning används samma mätmetod. Mätmetoden används även för att testa robotgräsklipparen utan reglersystem för att se dess relevans. Robotgräsklipparen kommer att köra på en gräsmatta utan lutning samt en med uppmätt lutning på minst 20 grader. För att testa att kravet på avvikelsen från riktkursen i lutning uppfylls kommer robotgräsklipparen ha en körriktning både uppför, ortogonalt och diagonalt mot lutningen. En illustrerande bild av körriktningarna i lutning visas i figur 3.22.



Figur 3.22: Illustrerande bild av robotgräsklipparens körriktningar vid test i lutning

Testerna är utformade på så sätt att de är repetitiva och ska kunna utföras på samma sätt flera gånger om. Då det är svårt att placera robotgräsklipparen i samma startposition för att alltid hålla exakt samma riktning mäts en ny riktning upp vid varje test. Genom att lägga en laseravståndsmätare på robotgräsklipparens sida och lysa med lasern erhålls ett riktmål på det önskade avståndet. Detta riktmål markeras ut genom att sätta en mätpinne i marken. Därefter sätts robotgräsklipparen igång för att åka mot riktmålet och sedan stängas av när den befinner sig parallellt med riktmålet. Då mäts avståndet från riktmålet till robotgräsklipparens främre kant med avståndsmätaren för att erhålla avvikelser. Metoden illustreras i figur 3.23. Antalet gånger testet utförs baseras på reperterbarheten av resultaten.



Figur 3.23: Illustrerande bild av hur avvikelser y mäts efter körning x meter i de olika testfallen.

För att testa framkomlighet i lutningar mindre än 20 grader kolliderar robotgräsklipparen med hinder rakt nedåt eller uppåt backen. Prototypen måste då hantera hindren, d.v.s. stanna, backa och ändra riktning utan att exempelvis slira. Metoden för att avgöra om detta problem är löst genomförs genom att först låta robotgräsklipparen köra rakt nedför en backe på minst 20 grader och sedan placera ett hinder rakt framför den. Robotgräsklipparen ska då hantera detta hinder och sedan flyttas hindret till robotgräsklipparens nya kurs för att kollidera igen. Hindret ska placeras så att testet hela tiden utförs i en lutning på minst 20 grader. Detta upprepas 20 gånger och om robotgräsklipparen klarar alla kollisioner utan att på något sätt misslyckas, är testet lyckat.

3.5.2 Mätinstrument och testområde

De mätinstrument som används under testen är avståndsmätare, måttband, tidtagarur och mätpinnar. Avståndsmätaren som används i testerna är av modellen COTECH LM400, vilken lånades ut av Gunnar Elgered, professor på elektrisk mätteknik och prefekt i Rymd-, geo- och miljövetenskap på Chalmers tekniska högskola. Avståndsmätaren har en maximal mätosäkerhet på 3 [mm] med ett 95% konfidensintervall på avstånd mellan 5 [cm] och 10 [m]. Efter 10 [m] ökar mätosäkerheten med 0.15 [mm] per meter.

En gräsmatta i goda förhållanden med brant lutning krävs för att kunna utföra testerna. Med goda förhållanden menas i detta fall torrt gräs, goda väderförhållanden och små ojämnheter, såsom gropar och jordhögar. Testplatsen som valdes visas

i figur 3.24. Medellutningen i det markerade området mäts m.h.a. avståndsmätaren till 24 ± 1 grader. Detta område används till testerna för avvikelse efter 5 [m] samt vid testerna av framkomlighet. Testplatsen har gropar med 3 [cm] djup och 10 [cm] i diameter.



Figur 3.24: Bild på den valda testplatsen. Medellutningen i det markerade området är 24 grader

4

Resultat

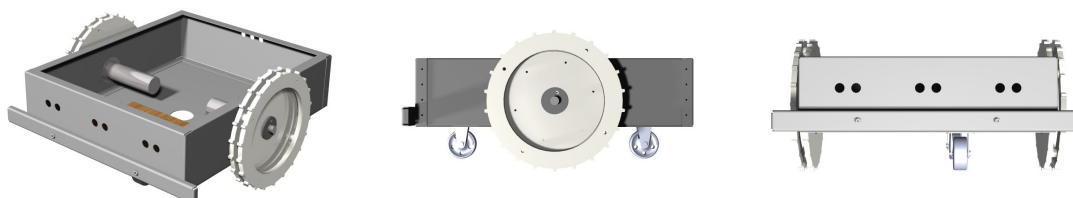
I detta kapitel presenteras den slutliga prototypen samt resultatet från de tester som genomförts enligt testplanen från kapitel 3.5. Den slutgiltiga prototypen som testerna utförts på visas i figur 4.1 och består av de komponenter som tidigare behandlats i kapitel 3.



Figur 4.1: Slutgiltig prototyp

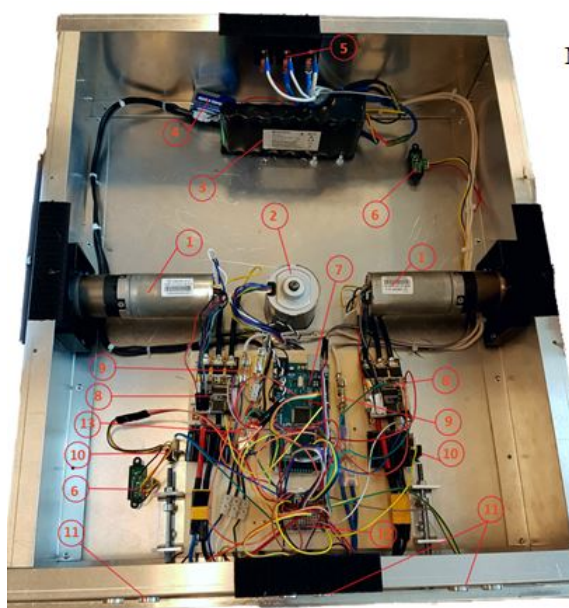
4.1 Slutgiltig prototyp av mekanisk och elektrisk konstruktion

Den slutgiltiga prototypen utan elektriska komponenter presenteras i tre olika vyer i figur 4.2. För fullständig materiallista samt en sprängskiss över robotgräsklipparens mekaniska komponenter, se appendix I.



Figur 4.2: CAD-modell av sammansatt konstruktion utan elektronikkomponenter

I figur 4.3 visas en översikt över de elektriska komponenterna med en tillhörande komponentlista. I figuren syns det att prototypens invändiga utrymme är överdimensionerat då en stor del av utrymmet inte används.



Nummer	Komponent	Antal
1	Drivmotor	2
2	Klippmotor	1
3	Batteri till motorer Li-ion 18V nominell (3,2Ah)	1
4	Batteri till Arduino 9V	1
5	Strömbrytare	3
6	Lyftsensor/IR-sensor	2
7	Arduino Mega	1
8	VESC (styrkort drivmotor)	2
9	Glassäkring	3
10	Stötsensor/microswitch	2
11	Ultraljudsensor	3
12	Gyroskop	1
13	ESC (styrkort klippmotor)	1

Figur 4.3: Översikt över elektriska komponenter med tillhörande komponentlista

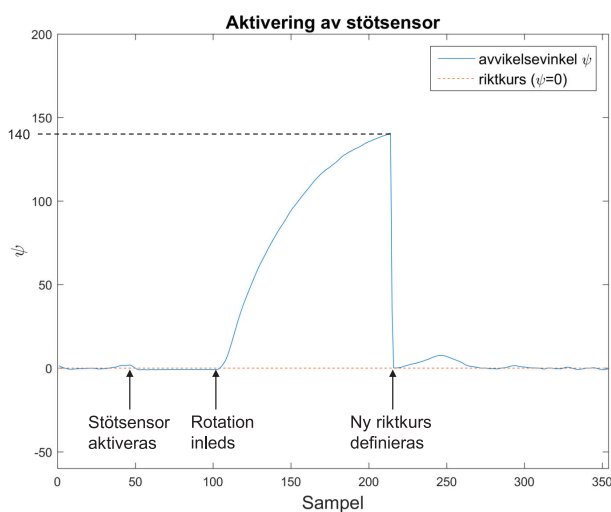
4.2 Enklare tester för att utvärdera prototypens funktion

Många av prototypens funktioner kunde testas okulärt eller med enklare testmetoder så som vägning eller mätning. Det anses tillräckligt att enbart utföra dessa tester en gång. Resultatet från dessa tester presenteras i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Enklare tester som utförts okulärt eller med enklare testmetoder

Test	Utförande	Resultat
Klipphöjd	Mätning mellan klippskivan och marken med måttband	50 [mm]
Hålla sig inom begränsat område	Kör robotgräsklipparen i ett område begränsat med väggar i 2 min	Krav uppfyllt
Tid för att stanna drivmotorer vid kollision	Tidtagning med tidtagarur	< 0.5 s
Detektera föremål framför dess körriktning	Placera föremål framför robotgräsklipparen och mät avståndet där emellan när föremålet detekteras	300 [mm]
Aktivering av lyftsensor	Lyft robotgräsklipparen manuellt och mät avståndet från hjulet till marken när sensorn aktiveras	80 [mm]
Total vikt	Placera robotgräsklipparen på en digital våg	7,0 [kg]
Höjd	Mätning med måttband samt verifiering utefter CAD-modell	240 [mm]
Bredd	Mätning med måttband samt verifiering utefter CAD-modell	500 [mm]
Längd	Mätning med måttband samt verifiering utefter CAD-modell	570 [mm]

Vid aktivering av stötsensorn ser vinkeländringen ut så som i figur 4.4. Då stötsensorn aktiveras stannar robotgräsklipparen en kort stund, backar tillbaka en sträcka för att sedan rotera en slumpvis vinkel vilket i detta fall var 140 grader. När rotationen är slutförd definieras en ny referensriktning som robotgräsklipparen ska följa.



Figur 4.4: Vinkeländring ψ vid aktivering av stötsensor

4.3 Tester för att utvärdera prototypens förmåga att hålla rak kurs

För att utvärdera robotgräsklipparens förmåga att hålla rak kurs utförs repetitiva tester enligt den testmetod som beskrevs i delavsnitt 3.5.1. Samma typ av test utförs under de förhållanden som presenteras i tabell 4.2. En observerbar mätosäkerhet på testmetoden iakttas till att vara 5 [cm]. Denna mätosäkerhet orsakas av mänsklig faktor och uppkommer då riktkursen skall mätas ut. Den mänskliga faktorn är mycket större än instrumentets mätosäkerhet, vilken av denna andledning försummas. Testerna repeteras 12 gånger för att minska påverkan från utstickande resultat.

Tabell 4.2: Förhållande för avvikelsetester

	Plan mark	Ortogonal mot lutning	Diagonalt uppför lutning	Rakt upp för lutning
Körsträcka [m]	10	5	5	5
Antal tester	12	12	12	12
Lutning [grader]	0	24	24	24

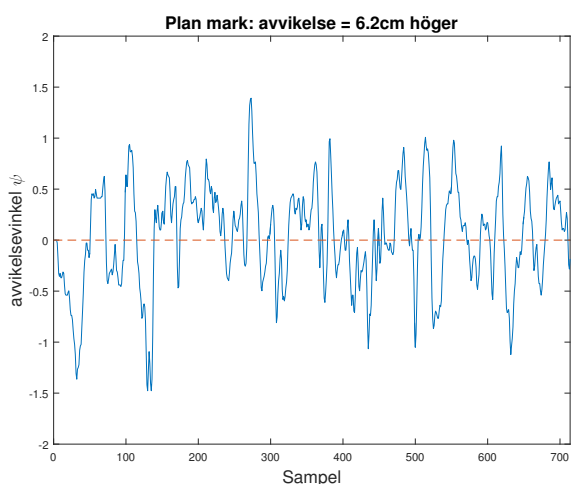
I tabell 4.3 visas avvikelserna från alla utförda tester för de olika förhållandena samt numeriska värden på medelvärde, median och standardavvikelse av absoluta värden på avvikelsen. Negativ avvikelse innebär avvikelse åt höger i robotgräsklipparens färdriktning. Det bör tilläggas att tester diagonalt uppför lutningen gjordes snett uppåt höger i backen och vid körning ortogonalt mot lutningen så innebär en vänstersväng att robotgräsklipparen åkte ned för backen.

Tabell 4.3: Samlad avvikelседata med numeriska värden: medelvärde, median och standardavvikelse

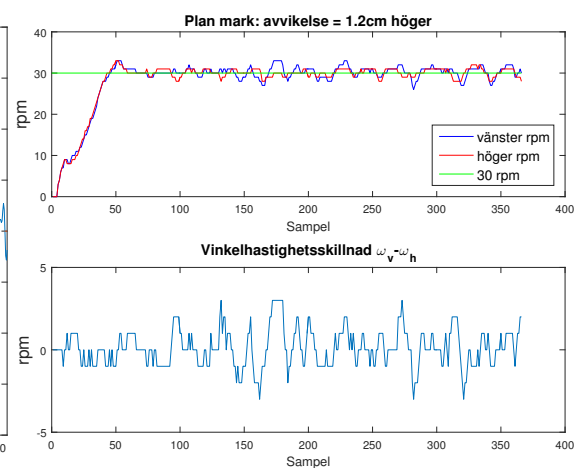
Datum: 2017-04-12	SSYX02-17-31	Chalmers Tekniska Högskola		
	Avvikelse plan mark [cm]	Avvikelse ortogonalt mot lutning (lutning nedåt är åt vänster) [cm]	Avvikelse diagonalt uppför lutning (lutning nedåt är åt höger) [cm]	Avvikelse rakt upp för lutning [cm]
Test 1	-2,3	28,2	-7,6	4,9
Test 2	2,2	20,6	-11,2	-3,2
Test 3	-13,7	20,0	-19,0	-3,3
Test 4	-15,5	23,9	-3,6	4,9
Test 5	-9,9	23,3	-6,9	11,2
Test 6	-2,3	20,9	-9,0	4,8
Test 7	-1,2	20,2	-6,7	5,5
Test 8	-6,1	20,8	-15,2	8,2
Test 9	-6,9	15,6	-16,9	-0,2
Test 10	-1,8	18,9	-5,3	-9,7
Test 11	6,2	26,6	4,4	9,7
Test 12	1,2	20,0	7,6	4,8
Medelvärde (abs)	5,78	21,58	9,45	5,87
Median (abs)	4,20	20,70	7,60	4,90
Standardavvikelse (abs)	4,96	3,43	5,05	3,21
Medelvärde	-4,18	21,58	-7,45	3,13
Median	-2,30	20,70	-7,25	4,85
Standardavvikelse	6,48	3,43	7,90	6,09

4.3.1 Tester vid plan mark

Nedan presenteras två olika tester på plan mark. I figur 4.5 visas hur avvikelsevinkeln ψ pendlar mellan -1,5 och 1,5 grader. Hjulens vinkelhastigheter accelererar först upp till 30 rpm, därefter varierar vinkelhastigheterna för att reglera vinkeln ψ till 0, se övre grafen i figur 4.6. I nedre grafen i figur 4.6 visas vinkelhastighetsskillnaden på hjulen.

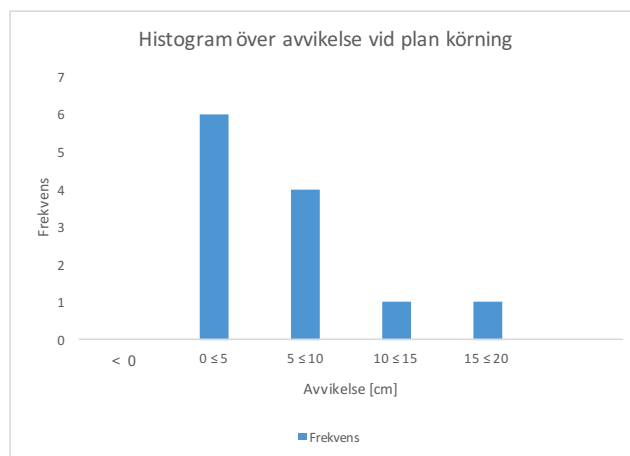


Figur 4.5: Samplad avvikelsevinkel ψ från gyroskopet med en slutlig avvikelse 6.2 cm höger



Figur 4.6: Grafer över vinkelhastigheter vid plan mark med en slutlig avvikelse 1.2 cm höger

Spridningen över den absoluta avvikelser vid plan mark var mellan 1.2 och 15.5 cm och visas i figur 4.7.

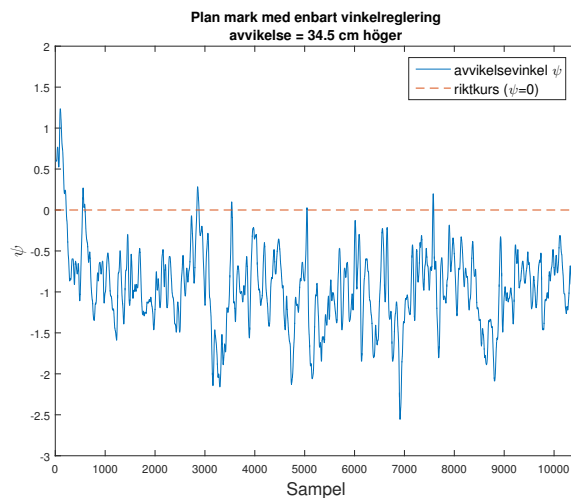


Figur 4.7: Histogram över avvikelser vid plan körning. Observera att ett absolutbelopp tagits på mätdata och hänsyn tas endast till den absoluta avvikelser

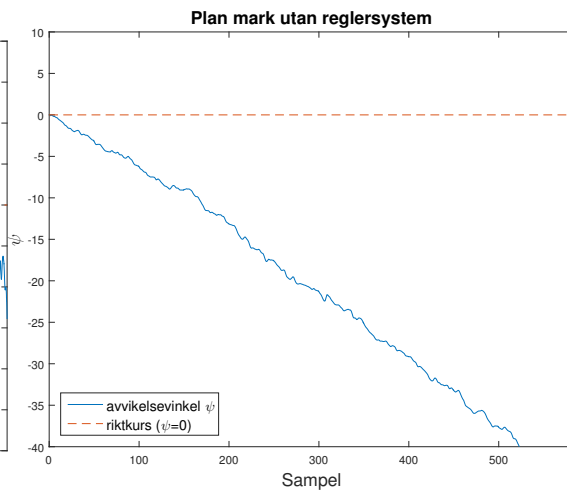
4. Resultat

För att testa reglersystemets betydelse för att hålla rak kurs utfördes även tester utan reglersystem samt tester med enbart vinkelreglering. I figur 4.8 visas ett testresultat vid 10 meters körning vid plan mark med enbart vinkelreglering, d.v.s. utan hastighetsreglering. Resultatet visar att avvikelsevinkeln var något negativ över tid med en slutlig avvikelse på 34.5 centimeter.

I figur 4.9 visas testresultatet vid 10 meters körning helt utan reglersystem. Anledningen till varför robotgräsklipparen avviker så pass mycket är för att drivhjulen inte håller samma vinkelhastighet utan hastighetsregleringen. Den slutliga avvikelsen efter 10 meters körning var då över 5 meter.



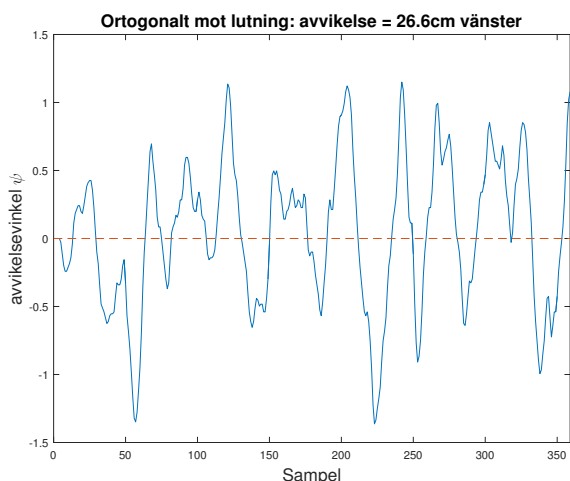
Figur 4.8: Samplad avvikelsevinkel ψ med enbart vinkelreglering med en slutlig avvikelse 34.5 cm höger



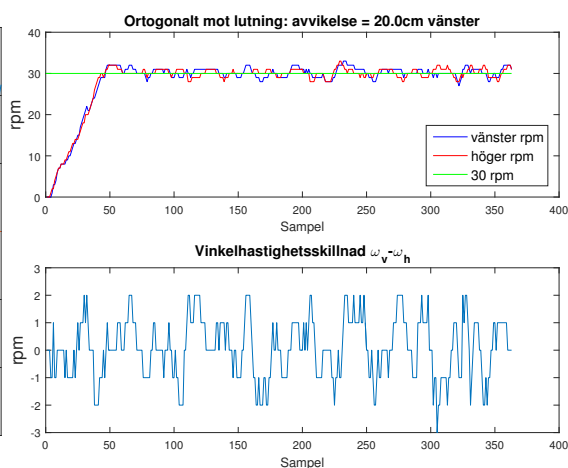
Figur 4.9: Samplad avvikelsevinkel ψ under 10 meters körning vid plan mark helt utan regulator

4.3.2 Tester ortogonalt mot lutning

Nedan presenteras två olika tester ortogonalt mot lutningen. I figur 4.10 visas hur avvikelsevinkeln ψ pendlar mellan -1,25 och 1,2 grader och övre grafen i figur 4.11 visas vinkelhastigheterna på hjulen som först accelererar upp till 30 rpm och sedan motverkar vinkeländringar.



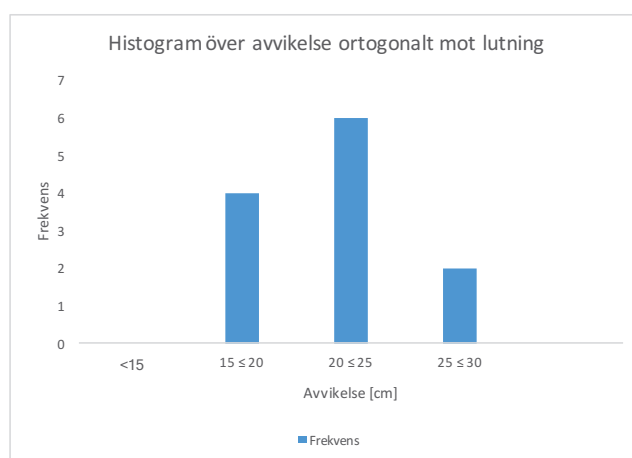
Figur 4.10: Samplad avvikelsevinkel ψ från gyroskopet med en slutlig avvikelse 26.6 cm vänster



Figur 4.11: Grafer över vinkelhastigheter ortogonalt mot lutningen med en slutlig avvikelse 20.0 cm vänster

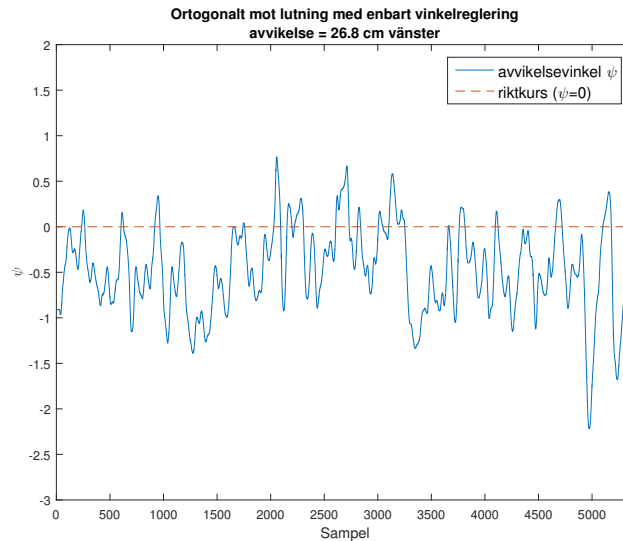
Anledningen till varför avvikelser blir relativt stor vid ortogonal körning trots att avvikelsevinkeln är liten över tid är för att robotgräsklipparen i detta fall glider i sidled vilket noterades vid testning. På så sätt är avvikelsevinkeln ψ oförändrad trots att avvikelserna ökar.

Spridningen över avvikelserna ortogonalt mot lutningen var mellan 15.6 och 28.2 cm och visas i figur 4.12.



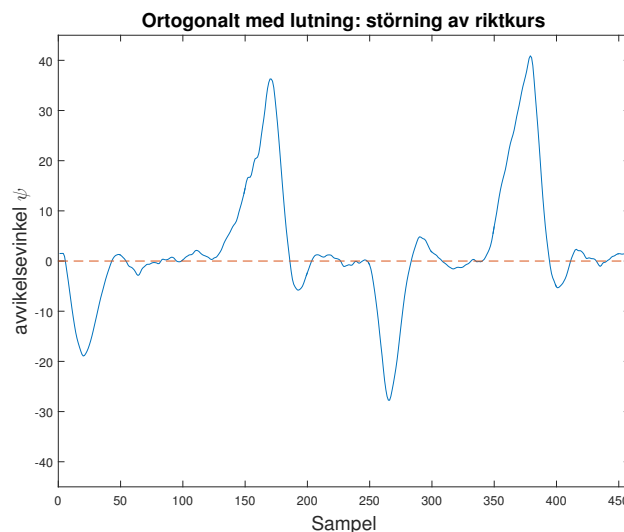
Figur 4.12: Histogram över avvikelserna vid körning ortogonalt mot lutningen

Vid 5 meters körning ortogonalt mot lutningen gjordes även tester med enbart vinkelreglering. Avvikelsevinkeln för ett sådant test presenteras i figur 4.13 med en slutlig avvikelse på 26,8 cm åt vänster, det vill säga ned för backen.



Figur 4.13: Avvikelsevinkel ψ med enbart vinkelreglering med slutlig avvikelse 26.8 cm vänster

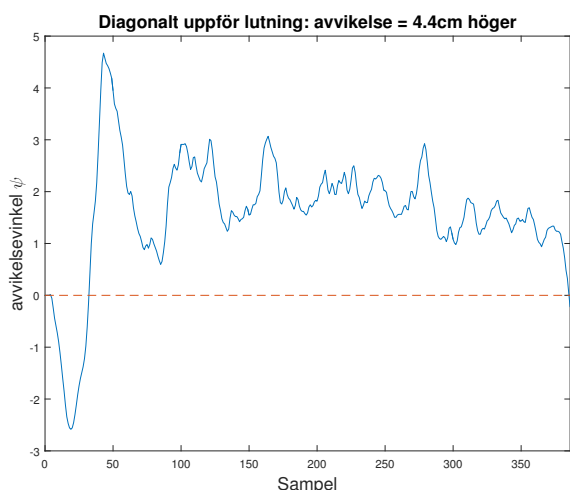
I figur 4.14 visas avvikelsevinkeln då robotgräsklipparen utsätts för störningar vid körning ortogonalt mot lutningen. Topparna som visas i grafen är då robotgräsklipparen vinklas manuellt under körning. Efter varje störning hittar prototypen tillbaka till referensriktningen med ett litet översläng. Detta test gjordes med både hastighets- och vinkelreglering inkopplad.



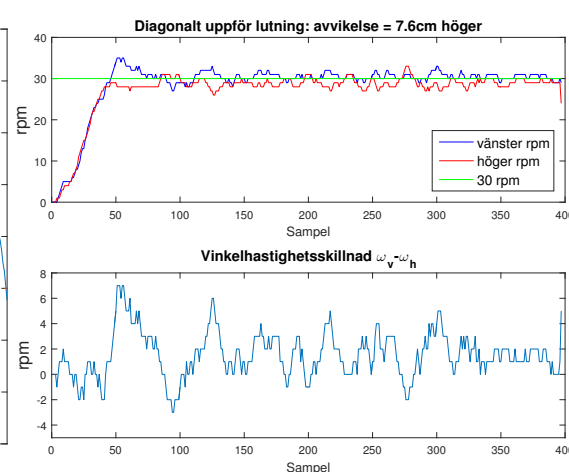
Figur 4.14: Körning ortogonalt mot lutningen där topparna representerar störningar

4.3.3 Tester diagonalt uppför lutning

Nedan presenteras två av testerna diagonalt uppför lutning. I figur 4.15 visas avvikelsevinkeln ψ och i figur 4.16 visas vinkelhastigheterna på hjulen samt vinkelhastighetsskillnaden.



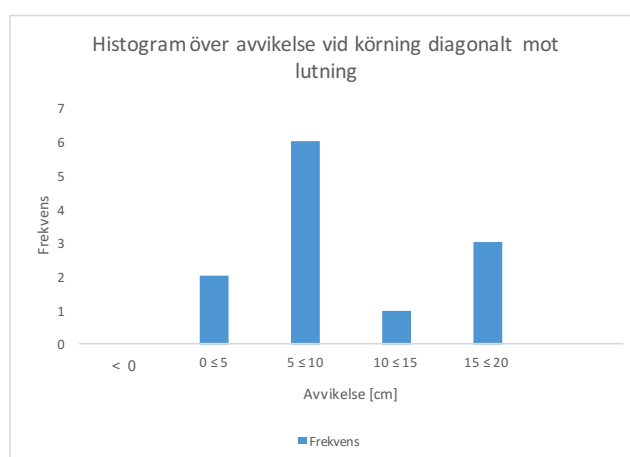
Figur 4.15: Samplad avvikelsevinkel ψ från gyroskopet med en slutlig avvikelse på 4.4 cm åt höger



Figur 4.16: Grafer över vinkelhastigheter diagonalt uppför lutning med en slutlig avvikelse 7.6 cm höger

Det går att notera i figur 4.15 att avvikelsevinkeln initialt blev kraftigt negativ vilket berodde på att ena hjulet fastnade. Efter störningen fås ett översläng till positiv vinkeln innan ψ regleras till 0 grader.

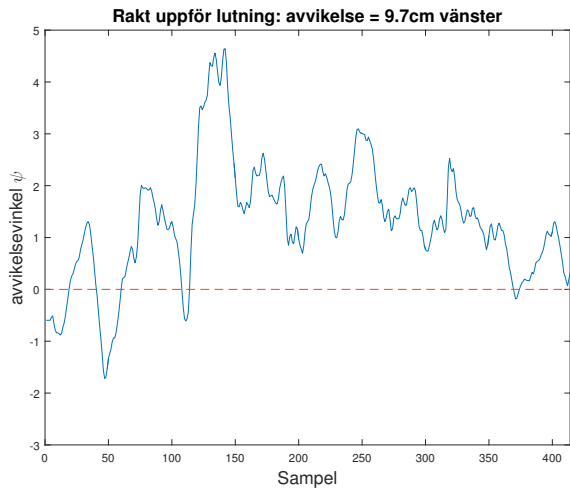
Spridningen över den absoluta avvikelserna diagonalt längs med lutning var mellan 3.6 och 16.9 cm och visas i figur 4.17.



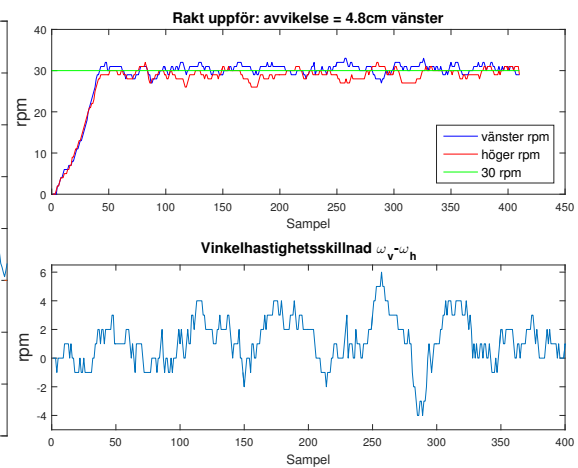
Figur 4.17: Histogram över avvikelserna vid körning diagonalt mot lutning. Observera att ett absolutbelopp tagits på mätdata och att hänsyn endast tas till den absoluta avvikelserna

4.3.4 Tester rakt upp för lutning

Nedan presenteras två av testerna rakt uppför lutning. I figur 4.18 visas avvikelsevinkeln ψ som i detta test låg inom intervallet -1,8 och 4,6 grader. I figur 4.19 visas vinkelhastigheterna på hjulen samt vinkelhastighetsskillnaden.

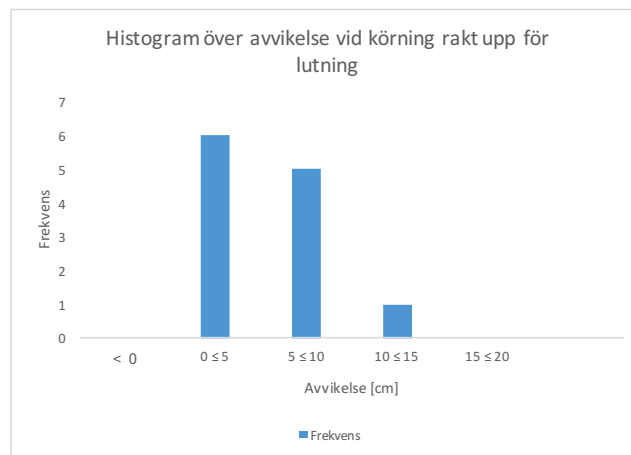


Figur 4.18: Samplad avvikelsevinkel ψ från gyroskopet med en slutlig avvikelse på 9.7 cm åt vänster



Figur 4.19: Grafer över vinkelhastigheter rakt uppför lutning med en slutlig avvikelse 4.8 cm åt vänster

Spridningen över den absoluta avvikelserna rakt upp för lutning var mellan 0.2 och 11.2 cm och visas i figur 4.20.



Figur 4.20: Histogram över avvikelserna vid körning rakt upp för lutning. Observera att ett absolutbelopp tagits på mätdatan och hänsyn tas endast till den absoluta avvikelserna

4.4 Validering av kravspecifikation

Utifrån de testresultat som presenterats tidigare görs en validering av kraven och önskemålen som specificerades i kravspecifikationen i tabell 2.1. Den validerade kravspecifikationen presenteras i tabell 4.4.

Tabell 4.4: Validering av kravspecifikation

Chalmers Tekniska Högskola		Kravspecifikation				
SSYX02		K/Ö	Målvärde	Enhet	Verifiering	Uppfyllnad
Kriterier						
Funktion	Lägsta klipphöjd	K	<60	mm	Test av prototyp	Ja
	Lägsta klipphöjd	Ö	<50	mm	Test av prototyp	Nej
	Hålla sig inom ett begränsat område	K		-	Test/simulering	Ja
	Stanna drivmotorerna vid kollision	K	1	s	Test/simulering	Ja
	Stanna drivmotorerna vid kollision	Ö	<1	s	Test/simulering	Ja
	Detektera föremål framför dess körriktning	K	>300	mm	Test/simulering	Ja
	Høj och sänkbart klippaggregat	Ö	30 - 50	mm	Test av prototyp	Nej
Prestanda	Max avvikelse från riktkurs efter 10 m körsträcka på torrt gräs vid 0° lutning	K	<200	mm	Test	Ja
	Max avvikelse från riktkurs efter 10 m körsträcka på torrt gräs vid 0° lutning	Ö	<100	mm	Test	Nej
	Max avvikelse från riktkurs efter 5 m körsträcka på torrt gräs vid lutning <20°	K	<1000	mm	Test	Ja
	Max avvikelse från riktkurs efter 5 m körsträcka på torrt gräs vid lutning <20°	Ö	<200	mm	Test	Nej
	Framkomlighet på torrt gräs vid lutningar <20° utan slirning	K		Ja	Test	Ja
	Hastighet	K	>0	m/s	Test/simulering	Ja
	Drifftid innan laddning	K	30	min	Beräkning	Ja
	Drifftid innan laddning	Ö	>30	min	Beräkning	Ja
	Svängradie	K	1000	mm	Beräkning/mätning	Ja
	Svängradie	Ö	0	mm	Beräkning/mätning	Ja
Säkerhet	Lyftsensorn aktiveras då alla hjul saknar kontakt med marken	Ö			Test	Nej
	Lyftsensorn aktiveras då ett hjul saknar kontakt med marken	K	<100	mm	Test	Ja
	Stanna klippaggregat då lyftsensorn aktiveras	K	<5	s	Test/simulering	-
	Stanna klippaggregat då lyftsensorn aktiveras	Ö	<2	s	Test/simulering	-
	Klippaggregatet är oåtkomligt då alla hjul har kontakt med marken	K			Konstruktion	Nej
	Kablage ska vara fastspänt och skyddat från omgivningen	K			Konstruktion	Ja
Dimensioner	Längd	K	<600	mm	Prototyp/CAD-modell	Ja
	Längd	Ö	<450	mm	Prototyp/CAD-modell	Nej
	Höjd	K	<250	mm	Prototyp/CAD-modell	Ja
	Höjd	Ö	<200	mm	Prototyp/CAD-modell	Nej
	Bredd	K	<500	mm	Prototyp/CAD-modell	Ja
	Bredd	Ö	<400	mm	Prototyp/CAD-modell	Nej
	Max vikt	K	15	kg	Mätning	Ja
	Max vikt	Ö	<10	kg	Mätning	Ja
Kostnader	Totalkostnad	Ö	<7000	SEK	Beräkning	Ja

5

Diskussion

I diskussionskapitlet tolkas och analyseras resultaten utifrån rapportens syfte. Vidare diskuteras resultatens konsekvenser och varför de är viktiga. Därtill kommer även felkällor och metodens inverkan på resultatet. Resultatet jämförs med dagens robotgräsklippare för att verifiera i vilken grad syftet uppnåts. Slutligen presenteras ett avsnitt kring vidareutveckling och övriga tillämpningar.

5.1 Tolkning och analys av huvudresultatet

Resultaten visar att problemen med lutningshantering kan lösas med hjälp av mönstrade hjul, sensorer, mikrokontroller och reglerteknik. Dessutom visar resultaten att prototypen hanterar körning i lutning med små avvikelser, samt utan att slita på underlaget vid testtillfällena. Vidare visar testerna att prototypen uppfyller de fundamentala krav som nämns i kravspecifikationen.

Utifrån den insamlade datan i tabell 4.3 går det att konstatera att de uppmätta resultaten under projektet överlag är mycket bra. Avvikelsen ligger i storleksordningen centimeter både på plan mark och vid körning i backe. Under alla testkörningar klarade prototypen att hålla sig innanför de satta kraven och delvis under de satta önskemålen.

I det mest kritiska fallet då robotgräsklipparen körs ortogonalt mot lutningen blev den genomsnittliga avvikelsen 21,6 [cm] under 5 [m] körning vilket är 78,4 [cm] under det satta kravet på 100 [cm]. Den minsta avvikelsen blev 15,6 [cm] och den största blev 28,2 [cm]. De relativt små avvikelserna har inte någon större betydelse för ändamålet. I detta sammanhang är det viktigaste att robotgräsklipparen inte viker av nedåt i backen så att den klipper gräsytan nedanför backen avsevärt mer än ytan ovanför. Utifrån det uppnådda resultatet bedöms detta ej bli fallet för den framtagna prototypen. Anledningen till att robotgräsklipparen får en större avvikelse vid körning i lutning har inte att göra med att den har en större vinkelavvikelse än vanligt. Detta syns då figur 4.10 jämförs mot figur 4.5, där figurerna visar vinkelavvikelsen för körning på plan mark respektive körning ortogonalt mot lutningen. Förklaringen är att hjulen stegvis gled ned för backen vilket inte ger ett vinkelpåslag. Detta kan man heuristiskt kompensera för.

Generellt för alla mätdata under körning på plan mark var att robotgräsklipparen vek av till höger. Förklaringen till detta är möjligtvis att ojämnheter i marken påverkat robotgräsklipparen att vika av till höger. Dessutom kan placeringen av stödhjulen ha påverkat resultatet då de ej är placerade längs centrumlinjen. Å andra sidan är avvikelserna väldigt liten och som tidigare nämnts är så små avvikelse av liten betydelse för ändamålet. Medelavvikelsen vid testning på plan mark blev 5,8 [cm] vilket är 14,2 [cm] under det satta kravet. Den största avvikelserna mättes upp till 15,5 [cm] och den minsta till 1,2 [cm]. Orsaken till spridningen är troligtvis beroende av mätfel vid uppställning av prototypen vid testningen.

Tilläggas kan även att reglersystemet är uppbyggt för att reglera vinkel och inte position. Följden av detta är att om robotgräsklipparen viker av så ges en vinkelförändring som justeras så att robotgräsklipparen hamnar på rätt kurs. Dock så kompenseras inte den positionsavvikelse som hinner uppstå innan vinkeln är noll igen. Alla dessa små avvikelser byggs på under robotgräsklipparens körtid vilket ger en logisk förklaring till att avvikelserna alltid skiljer sig från noll.

Resultatet ifrån testerna utan något reglersystem visade på väldigt stor avvikelse. Orsaken till detta är i synnerhet att de två drivhjulen går olika fort utan någon hastighetsreglering. För att ta reda på om robotgräsklipparen skulle kunna köra utan hastighetsreglering gjordes även testerna enbart med vinkelreglering vilket gav relativt goda resultat. Även fast hjulen inte håller det exakta börvärdet håller robotgräsklipparen kursen med hjälp av vinkelreglering. Problem som uppstår utan hastighetsreglering är dock att robotgräsklipparen kan få problem med att stå still i lutande plan då det inte finns någon regulator som ser till att hastigheten blir noll.

Att navigera utan avvikelse från angiven kurs är ett av huvudmålen, dessutom skall prototypen hantera hinder som befinner sig i lutning. Krocktesterna som utfördes i backe visade goda resultat och robotgräsklipparen bevisade att den kunde stanna, ta ny kurs och starta i lutning upp till 24 grader utan att slita på gräsmattan eller fastna vid hindret. Anledningen till detta är för det första att robotgräsklipparen är programmerad till att stegvis öka hastigheten efter stopp. För det andra påverkade de goda testförhållandena på så sätt att robotgräsklipparen hade väldigt bra fäste då gräset var torrt och kort. Som en följd av de observationer som gjorts vid testning går det att se att utformningen av drivhjulen har stor påverkan på hur robotgräsklipparen hanterar start och stopp i lutning. En balans mellan stora mönster som ger bra grepp som samtidigt inte förstör gräsmattan är centralt för att hantera hinder i branta lutningar.

Övriga tester som ej involverat körning i lutning, så som att robotgräsklipparen skall stanna när den lyfts, att den skall sakta in och stanna vid kollision, hålla sig inom ett begränsat område o.s.v. verifierades med enkla tester. Anledningen till att mindre fokus har legat på detta är främst att implementationen är relativt simpel och mycket information finns att hämta från säkra och välformulerade källor. Detta har lett till att resultatet främst inriktat sig mot lutningshantering.

5.2 Metodens inverkan på resultatet

Arbetet inleddes med att ställa upp en kravspecifikation och utifrån den kombinera litteraturstudie med val av komponenter. Fördelarna med den inledande metoden var att gruppen fick en överskådlig bild av hur en robotgräsklippare är uppbyggd. Som följd av detta underlättades arbetet med utformningen av den egna prototypen, vilket ledde till snabba resultat. Även tillverkningen av prototypen skedde relativt snabbt genom att parallellt arbeta med mekanisk konstruktion, elektrisk konstruktion, programmering och reglering. Följden blev att en osäkerhet uppstod i hur allt skulle passa ihop i slutändan. En mer utvecklad konstruktionsplan skulle ha underlättat i det stadiet av metoden.

Nästa faktor som påverkat resultatet är de avgränsningar som gjorts och skiljer projektets robotgräsklippare mot marknadens. Genom att avgränsa sig ifrån viktiga funktioner, så som att köra i blött gräs, tåla regn eller implementera begränsningskabel, har arbetet förenklats och många faktorer som skall räknas med vid konstruktion av en robotgräsklippare kan räknas bort. Resultatet skulle alltså förändra sig med förändrade avgränsningar, men när allt kommer omkring visar prototypen på bra resultat utifrån projektets syfte.

5.2.1 Iakttagelser vid mekanisk och elektrisk konstruktion

Den mekaniska konstruktionens syfte var att möjliggöra tester av robotgräsklipparens olika funktioner samtidigt som utformningen ej sträcker sig för långt ifrån en kommersiell produkt. Syftet med konstruktionen uppnåddes och tester var genomförbara. Problem som uppstod under konstruktionsfasen fick lösas provisoriskt. Vid montering har en del komponenter inte passat som planerat vilket har lösts manuellt med borr eller fil. Exempel på detta är kofångaren som gick emot ramen och dess hål fick då bearbetas med fil för att fungera. Problem av liknande karaktär har lösts på likande vis.

Under den elektriska konstruktionen uppstod problem med styrkortet till klippmotorn som ej höll måttet för de specifikationer som var angivna av säljaren. Av detta skäl reklamerades styrkortet vilket ej hjälpte. På grund av brist på pengar och tid fick prototypen avgränsas på så sätt att klippmotor och drivmotorer inte kunde köras samtidigt. För att testköra klippmotorn och dess funktioner fick drivmotorernas styrkort användas. En potentiell lösning till problemet är att köpa in samma styrkort som används till drivmotorerna eller en någon av de andra drivmotorerna som nämnts i delavsnitt 2.6.6. Den senare lösningen skulle fungera då dessa motorer inte behöver ett styrkort för borstlösa motorer.

5.2.2 Reglersystemets approximationer och dess följder

Under tiden prototypen tillverkades användes flera beräkningsmodeller vid framtagandet av bland annat reglersystemen. Då Husqvarna bidrog med drivmotorer saknades datablad och motorparametrarna togs då fram genom experiment. Följden av detta är att den matematiska modellen kan ha en viss felmarginal vilket i sig bidrar till att de framtagna reglerparametrarna till hastighetsregleringen fick justeras. Osäkerheten ledde till att det inte gick att förlita sig på teorin utan reglerparametrarna fick i slutändan optimeras genom att testa olika värden. Om regleringen skall förbättras och avvikelsen minimeras borde de exakta motorparametrarna införskaffas.

Ytterligare förenklingar infördes i vinkelregleringen där modellen för robotgräsklipparen approximerades till en punktmassa utan inbyggt tröghetsmoment. Denna approximation har dock endast inverkan på simuleringen och inte på implementationen i robotgräsklipparen.

5.2.3 Påverkan av vald testmetod

Vidare påverkade även mätfel som uppstod under testningen. Det är svårt att mäta upp robotgräsklipparens exakta kurs vilket kan ha inverkat på spridningen i testresultaten. Genom att använda sig av någon form av testplattform för att säkerställa att robotgräsklipparen startar från exakt samma punkt med samma riktning kunde mätfelet ha minskats.

5.3 Jämförelse med existerande robotgräsklippare

Utifrån specifikationerna av dagens robotgräsklippare i Appendix J placeras robotgräsklipparen bland de bästa på området lutningshantering av de kommersiella produkterna. Den existerande modellen *Ambrogio L85 Elite* har precis som den framtagna prototypen drivhjulen på mitten vilket utifrån projektets resultat och den angivna datan av Ambrogio skulle kunna visa på ett givande koncept som hjälper till att lösa problemet med drift i lutning.

Information om hur andra existerande robotgräsklippare använder ett gyroskop och vinkelreglering eller ej har varit svår att få tag på. Med andra ord går det inte att veta om det framtagna reglersystemet redan existerar på marknaden. Ytterligare har det varit svårt att göra någon kvalitativ jämförelse mot marknaden på grund av det ovannämnda.

5.4 Vidareutveckling och resultatets användningsområden

Som tidigare nämnts gled hjulen stegvis nerför backen vid körning ortogonalt mot lutningen. Detta resulterade i relativt stora avvikelser jämfört med de andra testfallen. Detta problem kan tänkas lösas på ett antal olika sätt.

En lösning är att göra så att hjulen har bättre grepp. Antingen genom att göra dubbarna mer spetsiga eller tillverka dem i ett annat material. Genom att applicera denna lösning kan följderna eventuellt bli att gräsmattan slits mer i det fallet att hjulen börjar slira.

En annan möjlig lösning skulle kunna vara att läsa av vilken lutning backen som robotgräsklipparen befinner sig i har. Om vinkeln är stor kan börsvärdet på robotgräsklipparens referensvinkel ändras till att vara en riktning uppför backen. Detta kan i så fall resultera i att felet som uppstår när hjulen glider nedför backen elimineras av det fel som uppstår av att robotgräsklipparen kör ett antal grader upp mot backen.

En tredje lösning är att köpa in en bättre IMU, i vilken accelerometern har en lägre felmarginal. Således går det att integrera accelerationen i robotgräsklipparens tre olika axlar två gånger för att sedan läsa av avvikelsen i sidled. Genom att reglera utefter sträckan robotgräsklipparen förflyttar sig i sidled, istället för vinkeln från gyroskopet, kan avvikelsen vid körning elimineras helt. Ovanstående lösningar till problemet implementerades aldrig i den befintliga prototypen på grund av brist på tid och pengar.

Tidigare nämndes även att alla krav i kravspecifikationen uppfyllades utan den inre delen av reglersystemet, om än med sämre resultat. Då det viktigaste är att robotgräsklipparen inte helt byter kurs vid körning i lutning är det möjligt att denna del av reglersystemet kan uteslutas. Detta skulle medföra att projektet skulle kunna utformas med enklare motorer utan sensorer. Vidare skulle det här kräva att motorerna är borstade då borstlösa motorer behöver sensorerna för att köra på låga varvtal, som visats i delavsnitt 2.6.2. Detta skulle resultera i en kortare livslängd hos motorerna vilket inte är optimalt för kommersiellt bruk. Däremot för hobbyprojekt skulle denna lösning lämpa sig då kombinationen av motor och styrkort i så fall skulle kunna bli billigare. En lösning för att hjulen ska stå stilla utan några sensorer efter att robotgräsklipparen har kolliderat behöver då tas fram.

Slutligen skulle det framtagna systemet behöva implementeras i en kommersiell robotgräsklippare för att säkerställa att det fungerar i en robotgräsklippare med alla funktioner som avgränsats i detta projekt. Om resultatet visar sig bra även då anses det finnas en billig lösning som går att implementera i robotgräsklippare som skall gå rakt på både plan mark och i lutning. Lösningen är av den karaktären att den kan användas av kommersiella produkter och hobbyprojekt. Resultatet visar dessutom på att det finns utrymme för optimering.

6

Slutsatser

En prototyp av en robotgräsklippare har framställts som uppfyller de grundläggande krav som ställts. Vidare är syftet med prototypen att hantera de problem som uppkommer vid drift i lutningar upp till 20 grader. Den framtagna lösningen uppfyller detta mål med god marginal.

Den framtagna lösningen består av en mekanisk och en reglerteknisk del. Den mekaniska delen består av två stora mönstrade drivhjul som placeras i mitten av robotgräsklipparen. Den reglertekniska delen består av ett gyroskop och ett reglersystem. Gyroskopet läser av robotgräsklipparens körriktning och reglersystemet justerar där efter kursen genom att ändra hastigheten på hjulen. Den framtagna prototypen hanterar lutningar upp till 24 grader utan större avvikelser eller slitage på underlaget.

I det kritiska läget, då robotgräsklipparen kör ortogonalt mot en backe med lutningen 24 grader, blev den genomsnittliga avvikelsen 22 centimeter efter 5 meters drift. Dessutom blev den genomsnittliga avvikelsen på plan mark 6 centimeter efter 10 meters drift. Resultatet går att jämföra med drift utan reglersystem där avvikelsen efter 10 meters drift på plan mark var över 5 meter.

Möjligheten att exkludera hastighetsregulatorn i reglersystemet behöver undersökas ytterligare. Tester av detta visade på avvikelser under de satta kraven. Problemet här är att robotgräsklipparen inte kan stå still i ett lutande plan utan hastighetsregleringen.

Avslutningsvis behöver en lösning för att eliminera avvikelsen i sidled tas fram. Reglersystemet som tagits fram i detta projekt klarar av att eliminera vinkelavvikelsen men tar inte hänsyn till om robotgräsklipparen förflyttat sig i sidled under tiden som vinkeln stabiliserats. Av detta skäl kan en positionsreglering vara relevant att implementera.

Appendix

A

Intervju med Endre Berta

Utdrag av skype-intervjun med Endre Berta, testingenjör på Husqvarna Group AB 2017-01-23 klockan 18:30. Utdraget är grammatiskt korrigerat för att inte fara med osanning.

F: Filip Petersson.

J: Jacob Landelius.

E: Endre Berta.

[...] = Delar av intervjun utelämnas

_____ = ord saknas pga bristande ljudkvalité

.. = kort paus

[...]

F- Det här med lutning i.., eller rätt så brant lutning.. Du arbetar lite som testare, eller vad var det?

E- Ja, Vi har.. Våra största, eller bästa gräsklippare idag säger vi att den klarar 45 % lutning, vi pratar procent istället för grader för att det är enklare för konsumenten att förstå, men .. Ja.. då är det inne i trädgården. Däremot, en säkerhetsaspekt som varje _____ klippare har är ju att, de har ju en sån här begränsningskabel som man rullar ut utmed tomtens periferi. Och där närmast begränsningskabeln är ju.. Jag tror att det är 20 % som vi garanterar att.., eller 25 som den klarar.. Och det beror på egentligen för att våra gräsklippare är ju bakhjulsdrivna och det är svårt att vända sig nära begränsningskabeln, du vet. Så att när man kommer ner till.., framförallt när man kör nära mot begränsningskabeln, då måste den stanna, backa och vända. Och det här momentet är ju.. Det är ju inte svårt egentligen att göra, men alltså.. Gravitationslagar och allt vad det kommer in i bilden och då blir det, då är det är det lätt att den antingen.. Välder gör den inte, men den kan ju spinna och så köra fast.., i branta lutningar.

F- Ja, finns det en anledning varför.. det är just bakhjulsdrivet då, att man inte kan ha fyrhjulsdrivet, eller är det helt enkelt den ekonomiska aspekten som.. kommer in där?

E- Nej, jag tror att det finns inga sådana aspekter, utan.. Det har varit _____ så och jag skulle inte vara förvånad om det kommer någon som kommer på någonting.

J-Hur är det med.. Just det här.. 45 grader, är det värstingvarianten som klarar av det eller...

E-45 %.

J-45 % ?

E- ja, det är.. 45 % vad kan det vara? Runt 30 grader eller något sådant.

J- Men vad skulle du säga eran enklaste, eller.. bland dem enklare, hur många procent klarar dem, ungefär..? Eller.. ja?

E- Dem enklaste varianterna som vi har är sådana 3-hjulingar som.. Två drivmotorer fram och en släpande bakhjul bak, dem klarar ju runt.. jag kommer inte ihåg exakt.. 25-30 % ?

F- Okej.. Men.. det här med lutning då, om vi fortsätter på det.. Problemet med lutningen är det.. Om den går rakt upp för backen eller är det att den inte går riktigt rakt när åker alltså.. Längs med backen?

E-Ja, alltså det kan vara allting, både upp och nedåt.. Det bror på vart tyngdpunkten finns i maskinen.. En sak som vi har ju försökt jobba med hela tiden att.. Hitta tyngdpunkten. En bra tyngdpunkt är ju ganska lågt nära drivaxeln, men.. man kan väl säga att om man tittar på liksom motorplacering, batteriplacering och så vidare.. Ni måste hitta en bra balans mellan trycket på främre hjulen och bakre hjulen.

F-okej..

[...]

F- Tycker du det låter som en bra idé att försöka gå in på det här med lutning? Är det ett problem som är svårt att.. ta till?

E- Det är svårt. Då måste ni antingen bygga som en ja.. fyrhjuldriven eller som en.. stridsvagn med band eller något liknande. Och ja, vi som är i konsumentbranschen vi.. Studerar väldigt noga klipparnas beteende så att .. vi försöker liksom slita så lite som möjligt på gräset. Och det är det som egentligen kan hända i branta lutningar att.. Har man ett hinder mitt i en lutning då kan det hända att om klipparen säger vi kommer uppifrån, och.. träffar hindret, då måste den backa, då spinner hjulet och då kommer det förr eller senare slita gräset runt just det här.. hindret, eller begränsningskabeln eller vad som helst.

F- Mm, ja, jo vi får väl se.. För vi har ju inte tänkt att ta.. Säg 45 % lutning, det är väl kanske lite överkillför ett kandidatarbete, men.. Något liknande. Så har vi ju tänkt då att för stora trädgårdar.. Som har lite lutning i sig då.. Det är väl större chans att.. Robotgräsklipparen håller sig, alltså längst nere vid lutningen då? Att robotgräsklipparen svänger av i lutningen?

E- mm.. Nej, det är nog.. Eller naturligtvis, alltså det spelar viss.. roll för att den faller ju av liksom från lutningen, och statistiskt sett är det ju väl klippt mer.. Däremot

.. vi har ju GPS i våra.. Större modeller. Och då vet vi var vi har klippt någonstans och den sparar ju .. ja, lite data i sig och.. Då vet han att om jag har varit ett par gånger där borta då måste jag söka till andra områden.

F- ja, precis..

[...]

B

Pughmatrix

		Koncept					
		Vikt 1-5	1 (REF)	2	3	4	5
Kostnad		3	x	-	0	0	-
Framkomlighet	Lutningshantering upp för backe	5	x	+	+	0	+
	Lutningshantering parallellt med backe	5	x	+	0	+	+
	Manövrering	4	x	-	+	-	-
Grässlitage		2	x	+	0	0	+
Komplexitet	Antalet komponenter	1	x	-	0	0	-
	Implementering	2	x	-	0	0	-
	Antal "+"		x	12	9	5	12
	Antal "0"		x	0	5	5	0
	Antal "-"		x	10	0	4	10
	Summa +/-		x	2	9	1	2

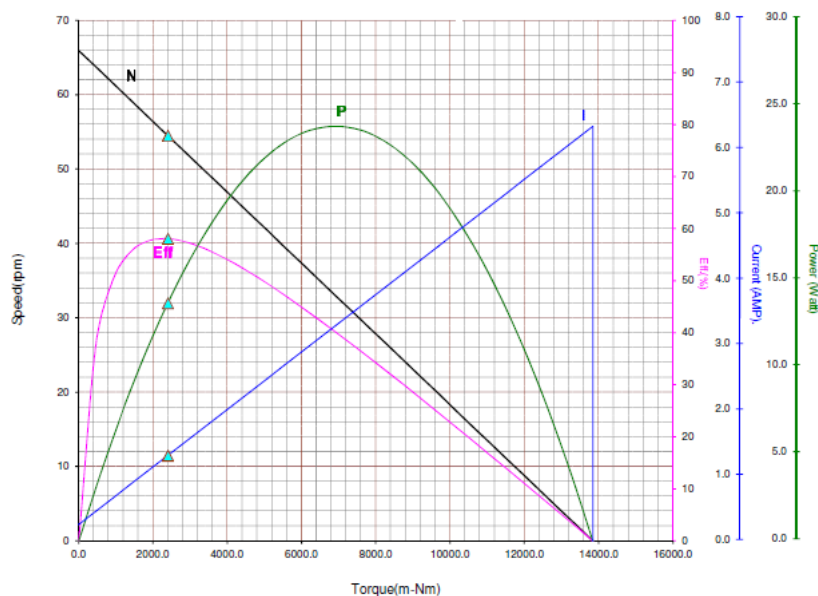
I pughmatrisen sätts koncept 1 som referens. Resterande koncept jämförs sedan med referensen utifrån olika viktade kriterier där

- + – bättre än referensen
- – sämre än referensen
- 0 – likvärdig referensen

De viktade betygen summeras slutligen vilket ger ett värde på hur koncepten förhåller sig till referensen. Pughmatrisen ovan resulterade i att koncept 3 fick avsevärt högre betyg än resterande koncept och därför gjordes inga ytterliggare pughiteringar.

C

Drivmotorernas karakteristik



Upmätta parametrar hos drivmotor

Motorspänning	u	18 V
Induktans	L_a	510 μ H
Resistans	R_a	0.77 Ohm
Mot-EMF	k_e	0.0912 V/rad/s
Strömomvandlingsfaktor	k_t	0.0841 Nm/A
Friktionskoefficient	b	0.0025 Nm/rad/s

D

Inställningar i BLDC Tool

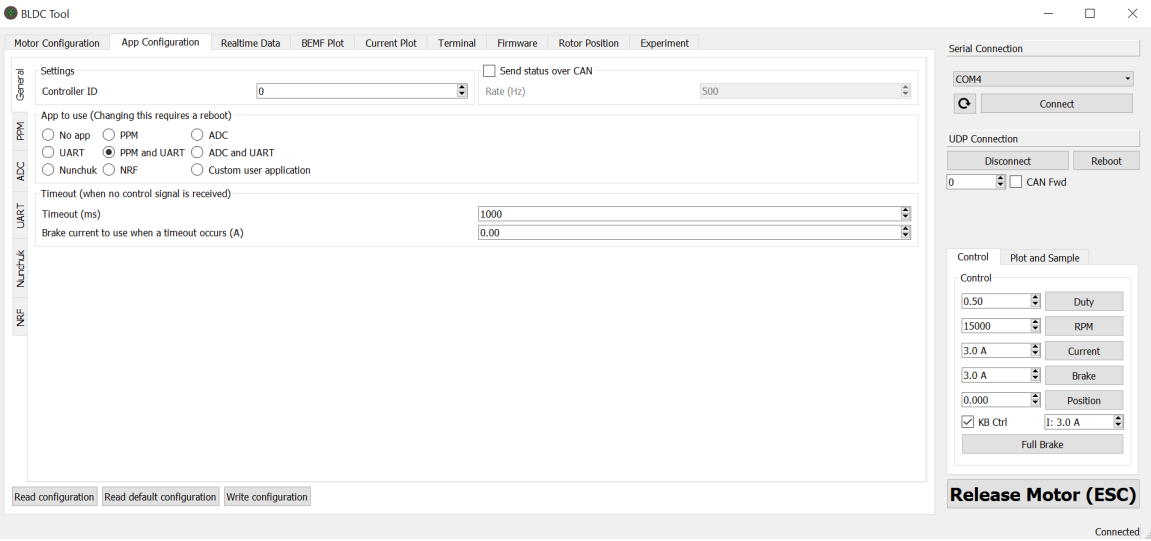
Motor konfiguration

The screenshot shows the 'Motor Configuration' window of the BLDC Tool. The 'Motor' tab is selected, and the 'Motor Type' is set to 'FOC'. The 'Current Limits' section includes fields for Motor max (6.00 A), Motor min (regen) (-6.00 A), Batt max (8.00 A), Batt min (regen) (-8.00 A), Absolute max (130.00 A), and a checked 'Slow absolute max' option. The 'Temperature Limits' section includes MOSFET Start (80.00 °C), MOSFET End (100.00 °C), Motor Start (80.00 °C), and Motor End (100.00 °C). The 'Other Limits' section includes Minimum duty cycle (0.005) and Maximum duty cycle (0.950). The 'RPM Limits (BLDC Only)' section includes a checked 'Limit ERPM with negative torque' option and fields for Min ERPM (-100000.00), Max ERPM (100000.00), Max ERPM at full brake (300.00), and Max ERPM at full brake in current control mode (1500.00). The 'Voltage Limits' section includes Minimum input voltage (16.50 V), Maximum input voltage (22.00 V), Battery cutoff start (17.00 V), and Battery cutoff end (16.50 V). The 'Serial Connection' panel on the right shows 'COM4' selected and a 'Connect' button. The 'UDP Connection' panel shows '0' selected and a 'CAN Fwd' checkbox. The 'Control' panel shows 'Duty' selected, with fields for 0.20, 15000, 3.0 A, 3.0 A, 0.000, and a checked 'KB Ctrl' checkbox. The 'Release Motor (ESC)' button is visible at the bottom right.

FOC konfiguration

The screenshot shows the 'FOC Configuration' window of the BLDC Tool. The 'Motor' tab is selected, and the 'Sensor Mode' is set to 'Hall'. The 'General' section includes fields for F_SW (20000 Hz), DTc (0.080 µs), Speed Tracker (Kp: 2000.00, Ki: 20000.00), Duty Downramp (Kp: 10.00, Ki: 200.00), and Openloop RPM (1200.00 RPM). The 'Sensorless Startup and Low Speed' section includes fields for Hyst (0.500 s), Time (0.500 s), D Current Injection (Duty: 0.000, Factor: 0.00). The 'Motor Parameters (for Sensorless and Hall Operation)' section includes fields for R (0.79335 Ω), L (545.55 µH), λ (0.024080), Observer Gain (x1M) (1.83), and a 'Calc (Req: L)' button. The 'Hall Sensors' section includes a table with values 255, 102, 163, 131, 32, 69, 196, 255. The 'Detect and Calculate Parameters' section includes fields for Measure R and L (R: 0.00000 Ω, L: 0.00 µH, λ: 0.000000000), Measure A (Req: R) (I: 6.00 A, Duty: 0.50, RPM: 700.0), and Calc CC (Req: R and L) (TC: 1000.0 µs, Kp: 0.00000, Ki: 0.00). The 'Detect Encoder' section includes a field for Measure (I: 15.00 A) and a checked 'Invert Encoder' checkbox. The 'Detect Hall Sensors' section includes a field for Measure (I: 15.00 A) and a table with values 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0. The 'Serial Connection' panel on the right shows 'COM4' selected and a 'Connect' button. The 'UDP Connection' panel shows '0' selected and a 'CAN Fwd' checkbox. The 'Control' panel shows 'Duty' selected, with fields for 0.50, 15000, 3.0 A, 3.0 A, 0.000, and a checked 'KB Ctrl' checkbox. The 'Release Motor (ESC)' button is visible at the bottom right.

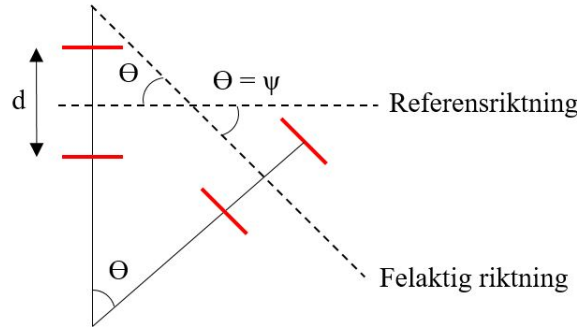
Applikations konfiguration



E

Härledning av robotgräsklipparens överföringsfunktion

Vinkeln $\psi = \theta$ är vinkeln mellan referensriktningen och den felaktiga riktningen enligt figuren nedan. Figuren visar robotgräsklipparen ovanifrån där de röda strecken motsvarar drivhjulen.



För cirkelrörelser gäller

$$v_v - v_h = d\dot{\psi} \quad \text{där} \quad \begin{cases} v_v = R_{hj\ddot{u}l}\omega_v & \text{hastighet p\aa v\aa nster hj\ddot{u}l} \\ v_h = R_{hj\ddot{u}l}\omega_h & \text{hastighet p\aa h\ddot{o}ger hj\ddot{u}l} \end{cases}$$

vilket medf\ddot{o}r att

$$\dot{\psi} = \frac{(\omega_v - \omega_h)R_{hj\ddot{u}l}}{d}$$

d\aa r radien p\aa drivhj\ddot{u}len $R_{hj\ddot{u}l} = 120mm$ och avst\aa ndet mellan drivhj\ddot{u}len $d = 460mm$.

Eftersom det \aa r vinkeln ψ som ska regleras och inte vinkelhastigheten beh\ddot{o}ver $\dot{\psi}$ integreras vilket ger

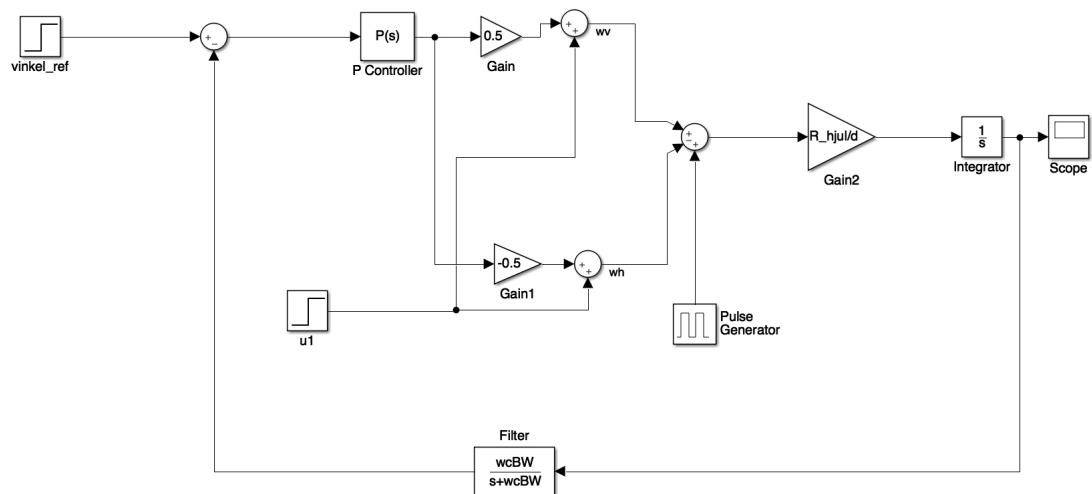
$$\psi = \frac{1}{s} \frac{(\omega_v - \omega_h)R_{hj\ddot{u}l}}{d} = \frac{1}{s} \frac{R_{hj\ddot{u}l}}{d} u_2 \quad \text{d\aa r} \quad u_2 = \omega_v - \omega_h$$

Fr\aa n ekvationen ovan ges \ddot{o}verf\ddot{o}ringsfunktionen fr\aa n styrsiglen u_2 till vinkeln ψ

$$G_{u_2\psi} = \frac{1}{s} \frac{R_{hj\ddot{u}l}}{d}$$

F

Simulink över vinkelreglering



Figur F.1: Blockschema i Simulink över systemet

G

Beräkning av hastighetsregulator

Nedan visas hur valet av regulatorstruktur till hastighetsregleringen går till. För att inte få ett kvarstående fel i regleringen designas en regulator med integrerande faktor. Regulatorn $F_{PI}(s)$ som skall bestämmas ser ut som ekvationen nedan.

$$F_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{G.1})$$

Regulatorn designas med en fasmarginal φ_m på 75 grader och överkorsningsfrekvensen $\omega_c = 24$. Utifrån blockschemat i figur 3.20 ges kretsöverföringen $L(s) = G_{uw}(s)F(s)$. För att få ut regulatorparametrarna K_p och T_i sätts två villkor:

$$|L(j\omega_c)| = 1 \quad (\text{G.2})$$

$$\arg(L(j\omega_c)) = -180^\circ + \varphi_m \quad (\text{G.3})$$

Villkoret i ekvation (G.3) utvecklas enligt följande

$$\arg(L(j\omega_c)) = \arg(G_{uw}(j\omega_c)F(j\omega_c)) = \arg(G_{uw}(j\omega_c)) + \arg(F(j\omega_c))$$

där

$$\arg(G_{uw}(j\omega_c)) = -63.3^\circ \quad (\text{Läses av i bodediagrammet i figur G.1}) \quad (\text{G.4})$$

$$\arg(F(j\omega_c)) = \arg(T_i j\omega_c + 1) - \arg(T_i j\omega_c) = \arctan\left(\frac{T_i \omega_c}{1}\right) - 90^\circ \quad (\text{G.5})$$

Genom att använda ekvation (G.4) och (G.5) i villkoret (G.3) ges följande uttryck för T_i

$$T_i = \frac{\tan(-120^\circ + 90^\circ + 63.3^\circ)}{\omega_c} = 0.0468 \quad (\text{G.6})$$

På liknande vis används villkoret (G.2) för att få ut K_p . Utveckling av ekvationen ger

$$|L(j\omega_c)| = |(G_{uw}(j\omega_c))F(j\omega_c)|$$

där

$$|(G_{uw}(j\omega_c))| = 4.06 \quad (\text{Läses av i bodediagrammet i figur G.1}) \quad (\text{G.7})$$

$$|F(j\omega_c)| = \frac{K_p \sqrt{T_i^2 \omega_c^2 + 1}}{T_i \omega_c} \quad (\text{G.8})$$

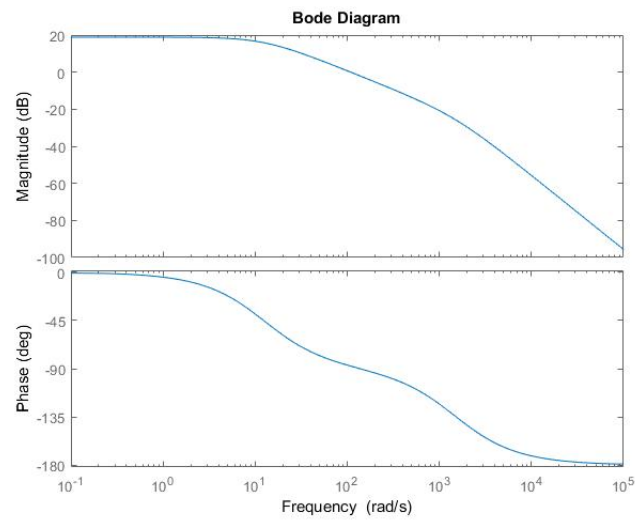
Uttrycken i ekvationerna (G.7) och (G.8) tillsammans med villkoret (G.2) ger

$$K_p = \frac{T_i \omega_c}{4.06 \sqrt{T_i^2 \omega_c^2 + 1}} = 0.184 \quad (\text{G.9})$$

K_i ges sedan av ekvationen

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 3.93 \approx 4 \quad (\text{G.10})$$

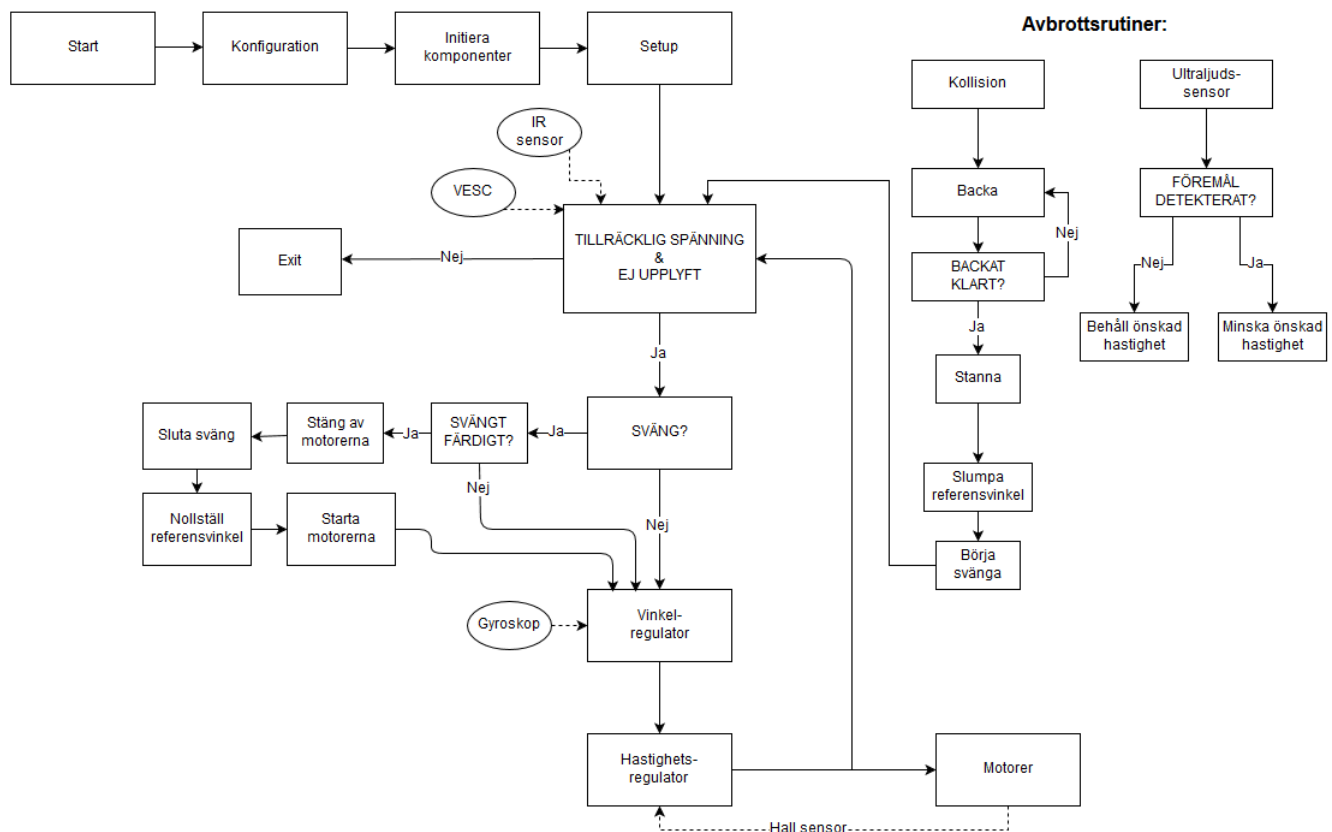
Nedan visas bodediagrammet över $G_{u\omega}$.



Figur G.1: Bodediagram av överföringsfunktionen $G_{u\omega}$

H

Översiktligt flödeschema för koden



Konfiguration

```

/*
 * Configuration file
 * Used to define values of the RKG and all of its components
 */

#ifndef CONFIG_H
#define CONFIG_H

////////////////////
// ::: Parameters :::
////////////////////

/*
 * Arduino
 * Used by IR, ObjectManagement & IMU.
 */
#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
#include "Arduino.h"
#else
#include "WProgram.h"
#endif
#define LEDPIN 13

/*
 * Regulator parameters
 */
#define KP_F 1 // KP value of P-regulator controlling angle offset

#define KP 0.5 // KP value of PID-regualtor controlling RPM offset
#define KI 4 // KI value of PID-regualtor controlling RPM offset
#define KD 0.00 // KD value of PID-regualtor controlling RPM offset
#define TF 0.000 // TF value of PID-regualtor controlling RPM offset

/*
 * Object management
 */
#define PERIOD 0.03 // Period in seconds, whole program 0.04
#define BACKTIME 4 // How long the RKG goes backwards after collision

/*
 * Intertial Measurement Unit (IMU)
 */
#include "stdint.h" // Enables use of uint8_t
#include "Wire.h" // Used to connect with the IC2 device

// Arduino mega 2560 rev3 addresses used by the IMU.
#define MPU9250_ADDRESS 0x68
#define MAG_ADDRESS 0x0C
#define GYRO_FULL_SCALE_2000_DPS 0x18
#define ACC_FULL_SCALE_16_G 0x18
#define ACC_SENSITIVITY 2048

#define GRAVITY 9.82 // Gravity in Sweden

/*
 * Bumper sensor
 */
#define BUMPERPIN 18 // PIN used by the bumper sensor

/*
 * IR sensor
 */
#define IRPIN_FRONT 5
#define IRPIN_BACK 6
#define IR_TRIGGER_DISTANCE 130
#define IR_MAX_COUNT 10

#endif // CONFIG_H

```

```

/*
 * Ultrasonic sensor
 */
#define TIMER1_US 50 // Timer ticks every 50 uS
#define TICK_COUNTS 4000 // 200 mS worth of timer ticks, trigger USS pulse
#define MAX_COUNT 2 // How many time distance is allowed to go past max_distance

#define USS_MIN_DISTANCE 50 // Echo_recieve will return true when distance is below 80 cm
// PINs used to send pulses
#define USS_TRIGGER1 12 // Left sensor
#define USS_TRIGGER2 11 // Mid sensor
#define USS_TRIGGER3 10 // Right sensor
// PINs used to recieve echos
#define USS_ECHO1 2 // Left sensor
#define USS_ECHO2 3 // Mid sensor
#define USS_ECHO3 19 // Right sensor

/*
 * Motor
 */
#define MAX_RPM 65 // Maximum rotations per minute allowed for the motors
#define AVG_RPM 30 // Normal RPM of the motors
#define HALL2RPM 57.75 // Measured value for gear box and electric poles
#define MIN_VOLTAGE 17 // Minimum voltage recommended for battery
#define MOTORRIGHT 8 // Pin 8 is connected to the right motor
#define MOTORLEFT 9 // Pin 9 is connected to the left motor
#define SERIALRIGHT Serial3 // Serial ports connected to the right hall sensor
#define SERIALLEFT Serial2 // Serial ports connected to the left hall sensor

#include "vsc_uart.h"
#include <SPI.h>
#include <Servo.h>
#include "datatypes.h"

```


Inkluderingar, komponenter, regulatorvariabler och initiering

1.

```

// =====
// ::: Includes :::
// =====
#include "Config.h"
#include "IMU.h"
#include "Motor.h"
#include "Cutting.h"
#include "IR.h"
#include "USS.h"
#include "ObjectManagement.h"
#include <TimerOne.h>

```

2.

```

// =====
// ::: Components :::
// =====
IMU imu;
Motor rightMotor(MOTORRIGHT, SERIALRIGHT);
Motor leftMotor(MOTORLEFT, SERIALLEFT);
USS left_USS(USS_TRIGGER1, USS_ECHO1, USS_MIN_DISTANCE);
USS mid_USS(USS_TRIGGER2, USS_ECHO2, USS_MIN_DISTANCE);
USS right_USS(USS_TRIGGER3, USS_ECHO3, USS_MIN_DISTANCE);
ObjectManagement obj_management;
IR irFront(IRPIN_FRONT);
IR irBack(IRPIN_BACK);

```

3.

```

// =====
// ::: Regulator Variables :::
// =====
// Time
unsigned long timer_us;
static uint32_t pidTimer_us = 0;
double h;

// Reference values
float ref_angle = 0;
float ref_left;
float ref_right;

// Reference error
float e_angle;
float e_left;
float e_right;
float e_old_left;
float e_old_right;

// PID variables
float P_left;
float P_right;
float D_left;
float D_right;
float I_left;
float I_right;
float kp_f; // Outer P-reg

// PID output
float u_left;
float u_right;

// Control signal
float u1; // Angle
float u2; // Velocity

// Used for communication between USS
bool useLeftTrig = false;
bool useMidTrig = false;
bool useRightTrig = false;
bool useOn = true;

```

4.

```

// =====
// ::: Initializations :::
// =====
void setup()
{
    Serial.begin(115200);

    // Motors
    SERIALRIGHT.begin(115200); // Serial communication with hall sensors
    SERIALLEFT.begin(115200); // Serial communication with hall sensors
    rightMotor.initMotor(); // Initialise the right motor
    leftMotor.initMotor(); // Initialise the left motor
    obj_management.setAvgSpeed(AVG_RPM); // Set average speed for motors

    // Ultrasonic sensor (USS)
    left_USS.initUSS(); // Initialise the left USS
    mid_USS.initUSS(); // Initialise the mid USS
    right_USS.initUSS(); // Initialise the right USS
    Timer1.initialize(TIMER1_US); // Initialise timer1
    Timer1.attachInterrupt(triggerUSS); // Trigger USS every timer tick
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(USS_ECHO1), recieveEchoLeft, CHANGE); // Recieve echo when echo pin changes
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(USS_ECHO2), recieveEchomid, CHANGE); // Recieve echo when echo pin changes
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(USS_ECHO3), recieveEchoright, CHANGE); // Recieve echo when echo pin changes
    pinMode(LEDPIN, OUTPUT);

    // Bumper sensor
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(BUMPERPIN), bumperChange, HIGH); // Recieve echo when echo pin changes

    // Intertial Measurement Unit (IMU)
    kp_f = KP_F;
    imu.initIMU(); // Initialise the IMU
}

```

Reglersystem

5.

```

////////////////////////////////////
// ::: Control system :::
////////////////////////////////////
void loop()
{
    // Stop if RKG is lifted or if battery voltage is too low
    if(checkIR() || leftMotor.voltage < 17){
        leftMotor.stopMotor();
        rightMotor.stopMotor();
        Serial.println(leftMotor.voltage);
        while(1){
            digitalWrite(LEDPIN,HIGH);
            delay(500);
            digitalWrite(LEDPIN,LOW);
            delay(500);
        }
    }
}

/*
 * If RKG is done turning reset reference angle,
 * otherwise check current angle offset
 */
if(obj_management.turningDone(imu.angle[1])){
    leftMotor.stopMotor();
    rightMotor.stopMotor();
    imu.resetIMU();
    ussOn = true;
    kp_f = KP_F;
}

```

6.

```

/*
 * Outer control system
 * Keep angle offset small
 */
// Reference value
ref_angle = obj_management.getAngleRef();
u1 = obj_management.getAvgSpeed();

// Reference error
imu.updateIMU();
e_angle = ref_angle - ((imu.angle[1]));

// Control signal
u2 = kp_f * e_angle;

// Reference value for inner control system
ref_right = u1 + u2/2;
ref_left = u1 - u2/2;

```

7.

```

/*
 * Inner control system
 * Make sure both motors have the selected RPM
 */
// Time management
// h is time since last sample [us]
timer_us = micros();
h = (double)(timer_us - pidTimer_us) / 1000000.0;
pidTimer_us = timer_us;

// Read reference value (RPM from motors)
leftMotor.updateMotor();
rightMotor.updateMotor();
float leftRPM = leftMotor.readSpeed();
float rightRPM = rightMotor.readSpeed();

// Reference error
e_left = ref_left - leftRPM;
e_right = ref_right - rightRPM;

// PID-regulator
P_left = KP * e_left;
P_right = KP * e_right;

D_left = TF / (TF + h) * D_left + KD / (TF + h) * (e_left - e_old_left);
D_right = TF / (TF + h) * D_right + KD / (TF + h) * (e_right - e_old_right);

// Control signal
u_left = P_left + I_left + D_left;
u_right = P_right + I_right + D_right;

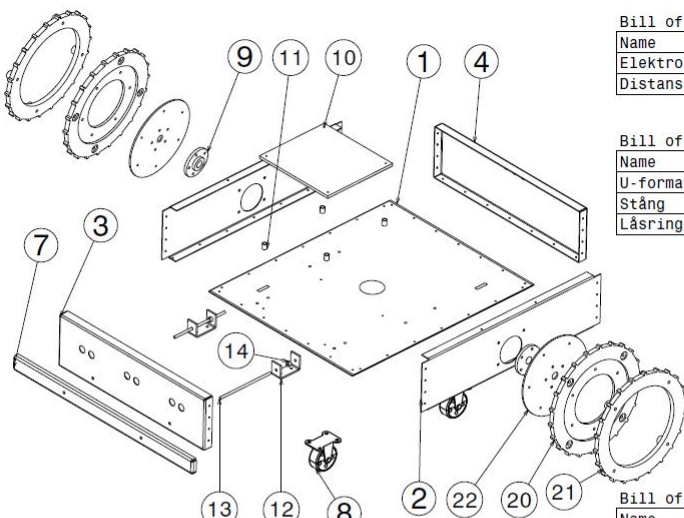
// Calculate I-value (Euler forward)
I_left = I_left + KI * h * e_left;
I_right = I_right + KI * h * e_right;

// Control system
leftMotor.setRPM(u_left);
rightMotor.setRPM(u_right);
}

```

I

Sprängskiss över mekaniska komponenter



Bill of Material: Elektronikplatta

Name	Number	Quantity	Material
Elektronikplatta	10	1	Plywood
Distans elektronikplatta	11	4	PLA

Bill of Material: Stötfångare fäste

Name	Number	Quantity	Material
U-format fäste	12	1	Aluminium 1050A
Stång	13	1	S235JR
Låsring	14	1	S235JR

Bill of Material: Robotgräsklippare

Name	Number	Quantity	Material
Botten	1	1	Aluminium 1050A
Sida	2	2	Aluminium 1050A
Framsida	3	1	Aluminium 1050A
Baksida	4	1	Aluminium 1050A
Stötfångare	7	1	Aluminium 1050A
Elektronikplatta	10	1	
Stötfångare fäste		2	
Stödhjul	8	2	
Drivhjul		2	
Motorfläns	9	2	

Bill of Material: Drivhjul

Name	Number	Quantity	Material
Hjul inner	20	1	PLA
Hjul ytter	21	1	PLA
Hjul mitten	22	1	Aluminium 1050A

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.

Robotgräsklippare			
DRAWING TITLE Sprängskiss			
DRAWN BY Simon Johansson	DATE 2017-05-02	SIZE A3	DRAWING NUMBER 1
CHECKED BY William Hubinette	DATE 2017-05-02	SCALE 1:6	REV
DESIGNED BY SSYX02-17-31	DATE		SHEET 1/1

J

Specifikationer av dagens robotgräsklippare

Modell	Klippyta [m ²]	Klipphöjd [mm]	Maximal lutning [°]	Maximal lutning vid begränsningskabel [°]	vikt [kg]	Pris [SEK]
Husqvarna Automower 315 [30]	1000	20-60	22	Ingen info	8,5	19500
Gardena R50Li [31]	500	20-50	14	Ingen info	7,4	8500
Ambrogio L85 Elite [10]	2200	25-65	28,8	19,3	14	21700
Honda Miimo 310 [32]	1500	20-60	24	10	12	14900
Biltema LMR 241 [33]	<2000	35-70	20	Ingen info	9,8	6000
Husqvarna Automower 105 [34]	600	20-50	14	Ingen info	6,5	12500

Litteraturförteckning

- [1] D. Sandberg (2013). Robotens och andra gräsklipparmaskinens utveckling och framtida potential i hemträdgården. Kandidatarbete på Sveriges lantbruksuniversitet
http://stud.epsilon.slu.se/6103/1/sandberg_d_130912.pdf.
Hämtad: 2017-01-24.
- [2] T. Mohammad Baloch and Timothy Thien Ching Kae. Design and modelling a prototype of a robotic lawn mower. In *2008 International Symposium on Information Technology*, volume 4, pages 1–5, Aug 2008. doi: 10.1109/ITSIM.2008.4631924.
- [3] Christine Connolly. Robotic lawnmowers. *Industrial Robot: An International Journal*, 34(4):273–276, 2007. doi: 10.1108/01439910710749573. URL <http://dx.doi.org/10.1108/01439910710749573>.
- [4] Qirong Tang and Werner Schiehlen. *From Lawnmower Dynamics to Modeling, Simulation and Experiments of a Differentially Driven Robot*, pages 365–374. Springer International Publishing, Cham, 2014. ISBN 978-3-319-07058-2. doi: 10.1007/978-3-319-07058-2_41. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2_41.
- [5] T. Kjellín (2013). Om gräsklipparens utveckling, att värdesätta sin fritid och att ta fram världens starkaste robotgräsklippare. Pressmeddelande Nordiska Trädgårdar.
<http://www.nordiskatradgardar.se/press/pressmeddelanden/utstallare/7048>. Hämtad: 2017-01-24.
- [6] Bäst i-test.se (2016). Robotgräsklippare: 13 modeller i test 2016.
<http://www.xn--bst-i-test-q5a.se/Robotgrasklippare>.
Hämtad: 2017-01-24.
- [7] D. George. How advanced autonomous robotic lawn mower works and steps for improvements. *Smashing Robotics*, 2014.
<https://www.smashingrobotics.com/how-advanced-autonomous-robotic-lawn-mower-works-and-steps-for-improvements/>.
- [8] Probotics. All robotic mowers are not the same.
<https://www.probotics.com/robotic-lawn-mowers/robot-mower-compare.htm>. Hämtad: 2017-01-31.

- [9] Li Gao Pingxia Zhang and Yongqiang Zhu. Study on control schemes of flexible steering system of a multi-axle all-wheel-steering robot. *Vol. 8(6) 1–13*, (2016). doi: 10.1177/1687814016651556.
- [10] Ambrogio robot. Produktblad för Ambrogio L85 Elite. <http://www.ambrogiorobot.com/se/models/view/l85-elite-1>. Hämtad: 2017-03-19.
- [11] A. Grauers (2002). Kompendium för grundkurs i Elkraftteknik på Chalmers tekniska högskola, pp. 174. Chalmers tekniska högskola.
- [12] Norman S. Currey. *Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices*. American Institute of Aeronautics Astronautics, Reston, 1988;2000;. ISBN 9780930403416;093040341X;093040441X;.
- [13] Stefan Baldursson. Bldc motor modelling and control - a matlab®/simulink® implementation. Master’s thesis, 2005.
- [14] J. P. John, S. S. Kumar, and B. Jaya. Space vector modulation based field oriented control scheme for brushless dc motors. In *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology*, pages 346–351, March 2011. doi: 10.1109/ICETECT.2011.5760141.
- [15] Ward Brown. Brushless dc motor control made easy. *Microchip Technology Inc*, pages 1–48, 2002.
- [16] Frank van Diggelen and Per Enge. The World’s first GPS MOOC and World-wide Laboratory using Smartphones. In *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015)*, pages 361–369, Tampa, Florida, September 2015.
- [17] Matej Andrejašic. Mems accelerometers. Technical report, University of Ljubljana, 2008.
- [18] Walter Wrigley and Walter M. Hollister. The gyroscope: Theory and application. *Science*, 149(3685):713–721, 1965. ISSN 0036-8075. doi: 10.1126/science.149.3685.713. URL <http://science.sciencemag.org/content/149/3685/713>.
- [19] F. Homm, N. Kaempchen, J. Ota, and D. Burschka. Efficient occupancy grid computation on the gpu with lidar and radar for road boundary detection. In *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 1006–1013, June 2010. doi: 10.1109/IVS.2010.5548091.
- [20] T. Mohammad. Using ultrasonic and infrared sensors for distance measurement. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. volume 3(3), pages 267–267, 2009.
- [21] Alex Nieva. Ultrasound. *sensorwiki*, 2016. <http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/ultrasound>.

- [22] SEK Svensk Elstandard. Elektriska hushållsapparater och liknande bruksföremål - Säkerhet - Del 2-107: Särskilda fordringar på batteridrivna robotgrasklippare. SS-EN 50636-2-107. 2015-04-15.
- [23] Ardumower Mower Motor. Ardumower
http://wiki.ardumower.de/index.php?title=Motor_driver.
Hämtad: 2017-04-06.
- [24] Nidec 22HB BLDC Specifications. Nidec
<http://www.nidec.com/en-EU/product/motor/category/A010/B020/P0000022/>.
Hämtad: 2017-02-23.
- [25] Aalco Metals Ltd. 1050a h14 sheet.
http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-1050A-H14-Sheet_57.ashx. Hämtad: 2017-03-30.
- [26] SIS/TK 142 Konstruktionsstål. Varmvalsade konstruktionsstål - Del 2: Tekniska leveransbestämmelser för olegerade stål. SS-EN 10025-2:2004. 2004-12-03.
- [27] J. Eriksson P.O. Hedner G. Härkegård G. Åkesson B. Broberg, B. Carlsson. *Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära*. Instant Book AB, Stockholm, 2014.
- [28] Arduinoboard Mega 2560. Arduino
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>.
Hämtad: 2017-04-03.
- [29] Y. Fujiwara. Self-synchronizing pulse position modulation with error tolerance. *IEEE Transactions on Information Theory*, 59(9):5352–5362, Sept 2013. ISSN 0018-9448. doi: 10.1109/TIT.2013.2262094.
- [30] Husqvarna. Produktblad för Husqvarna Automower 315. <http://www.husqvarna.com/se/produkter/robotgrasklippare/automower-315/967623421/>, .
Hämtad: 2017-03-19.
- [31] Gardena. Produktblad för Gardena R50Li. <http://www.gardena.com/se/lawn-care/robotic-mower/robotgrasklippare-r50li/>.
Hämtad: 2017-03-19.
- [32] Honda. Produktblad för Honda Miimo 310. <http://www.honda.se/lawn-and-garden/products/miimo/specifications.html#miimo310>.
Hämtad: 2017-03-19.
- [33] Biltema. Produktblad för Biltema LMR 241. <http://www.biltema.se/sv/Fritid/Tradgard/Maskiner/Grasklippare/Robotgrasklippare-LMR-241-2000037908/>.
Hämtad: 2017-03-19.

- [34] Husqvarna. Produktblad för Husqvarna Automower 105. <http://www.husqvarna.com/se/produkter/robotgrasklippare/automower-105/967622321/>, .
Hämtad: 2017-03-19.